

conseils pratiques pour la réalisation de traçages

détermination des paramètres hydrodispersifs d'un aquifère

C. Bouchet

octobre 1990
R 31 547

BRGM
SERVICES SOL ET SOUS-SOL
Département Eau
B.P. 6009 - 45060 ORLÉANS CEDEX 2 - France - Tél. : (33) 38.64.34.34

A V A N T - P R O P O S

La réalisation de traçage en vue de déterminer les caractéristiques hydro-dispersives d'un aquifère est une activité actuellement peu développée au sein du BRGM, généralement sous-traitée à l'extérieur à des organismes spécialisés tel que le CENG (Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble).

Les expérimentations de traçage peuvent présenter des caractéristiques très variées et s'avérer plus ou moins complexes à mettre en oeuvre selon les problèmes posés.

En ce qui concerne par exemple les multitraçages complexes, l'instrumentation et l'expérience d'organismes spécialisés semblent actuellement irremplaçables.

A l'inverse, les moyens et compétences existant au BRGM permettent, au minimum, de réaliser des traçages simples, par exemple une injection en écoulement radial convergent, en utilisant une méthodologie identique à celle appliquée par les organismes spécialisés.

Le type d'expérimentation précité représente un marché important dans les études de protection des eaux.

Les raisons nous incitant à réaliser ces opérations par nos propres moyens plutôt que par une sous-traitance systématique sont :

- *des coûts moindres (pour des traçages simples),*
- *l'absence de délais contraignants,*
- *la possibilité de coupler la vente et la mise en oeuvre d'un traçage à celui d'un pompage d'essai.*

La présente note, à usage strictement interne, a pour objet de présenter une ébauche de mode opératoire concernant la réalisation de traçages dans des cas simples. Elle a été établie à partir d'une expérience de quelques traçages réalisés à l'agence BRGM Bourgogne. Elle ne prétend en aucun cas traiter le sujet de façon exhaustive. Toutes critiques, suggestions et remarques constructives de la part des personnes ayant une expérience sur le sujet seront bien venues.

Cette note a été réalisée à l'occasion d'un contrat pour tiers géré par le Département de l'Eau et a bénéficié de l'appui de la formation professionnelle.

S O M M A I R E

1 - RAPPELS SUR LA FINALITE ET LE PRINCIPE DES TRACAGES ARTIFICIELS

1 - FINALITE DES TRACAGES ARTIFICIELS

Le marquage des eaux souterraines par des traceurs artificiels peut être utilisé à des fins plus ou moins différentes, selon la nature des aquifères considérés et le type de problème à résoudre. Généralement, les traçages sont réalisés pour :

- tester l'existence hypothétique d'une relation hydraulique entre deux points,
- mesurer une vitesse de circulation des eaux souterraines,
- déterminer les capacités d'un aquifère, à déformer un signal d'entrée à partir de l'étude de la distribution des temps de séjour (DTS),
- déterminer les caractéristiques hydrodispersives d'un aquifère et par là-même les modalités selon lesquelles un produit soluble, non interactif avec le milieu, va se propager dans le temps et dans l'espace, dans un aquifère isotrope et continu.

Les trois premiers points concernent essentiellement l'hydrogéologie des milieux fissurés et les aquifères karstiques tout particulièrement.

Le quatrième point concerne le milieu poreux, ainsi que les milieux fissurés pour lesquels l'échelle d'étude permet une assimilation du milieu à un milieu "poreux équivalent". Ce sont les traçages concernant ce dernier point, et lui seul, qui font l'objet de la présente note.

Les problèmes d'ingéniérie nécessitant ce type d'information sont :

- la détermination rationnelle des périmètres de protection,
- l'étude de la propagation de pollutions souterraines existantes ou potentielles,
- les dimensionnements de puits de dépollution et barrages hydrauliques à la pollution.

<u>Remarque</u> : *Des traçages artificiels peuvent également être réalisés à partir de traceurs interactifs avec le milieu pour quantifier des phénomènes physico-chimiques spécifiques se surimposant à l'hydrodispersion (adsorption, précipitation, dégradation, etc...). Cette pratique supplémentaire nécessite toutefois une approche hydrogéochimique ; elle ne sera pas abordée dans cette note.*

1.2. - PARAMETRES D'HYDRODISPERSION

L'évolution dans le temps et dans l'espace des concentrations d'un produit soluble, non interactif avec le milieu, injecté dans la zone saturée, est régie par les lois de l'hydrodispersion. La théorie de ces phénomènes ne fait pas l'objet de cette note, elle est succinctement rappelée en annexe 1. Nous nous limiterons à un rappel des notions intervenant dans les traçages ; pour plus de détail à ce sujet, cf. référence bibliographique [3].

Les caractéristiques hydrodispersives d'un aquifère continu, homogène et isotrope sont définies par trois paramètres :

- la porosité cinématique : Ω (sans unité),
- le coefficient de dispersion longitudinale : αL (mètre),
- le coefficient de dispersion transversale : αT (mètre).

Ces paramètres sont des grandeurs intrinsèques du milieu, donc théoriquement indépendantes des conditions de mesures (au même titre que T et S pour l'hydrodynamisme). Toutefois, pour de nombreuses expérimentations, certains auteurs ont pu constater des "effets d'échelle" affectant les coefficients de dispersion, dont les valeurs peuvent varier en fonction de la distance entre le point d'injection et le point de restitution [1].

La porosité cinématique caractérise essentiellement la composante convective du déplacement du fluide, les coefficients de dispersion, comme leur nom l'indique, traduisant les effets de dispersion.

Des ordres de grandeur de ces paramètres mesurés dans différents aquifères sont présentés en annexe 2.

1.3. - PRINCIPE DES TRACAGES EN MILIEU POREUX EN VUE DE DETERMINER LES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS D'UN AQUIFERE

Un traceur dit "parfait" est injecté dans la zone saturée en un point de l'aquifère. La restitution du traceur est observée en un ou plusieurs points situés en aval hydraulique.

L'injection du traceur peut être soit continue, soit instantanée. Le schéma hydraulique peut être soit un écoulement naturel uniforme, soit un écoulement radial convergent induit par pompage.

Les paramètres hydrodispersifs de l'aquifère sont déterminés par superposition des courbes de restitution expérimentales à des courbes théoriques correspondant aux solutions analytiques de la configuration retenue. Ces ajustements se font soit par abaques, soit préférentiellement de façon semi-automatique ou automatique par le logiciel CATTI du BRGM [2].

La programmation et la mise en oeuvre d'un traçage est une opération dont la complexité est très variable selon les cas. Les principales étapes d'un traçage sont schématisées sur la figure 1 ci-après.

Pour permettre une mesure correcte des paramètres hydrodispersifs, l'expérimentation de traçages doit répondre à certaines conditions :

- le schéma d'écoulement doit être connu et maîtrisé,
- le traceur doit affecter la totalité de l'aquifère mouillé afin de pouvoir ramener l'interprétation à un problème en deux dimensions,
- le signal d'entrée du traceur apprécié à partir de la disparition du traceur dans le puits d'injection doit être connu,
- le signal de restitution observé doit se distinguer sans ambiguité du bruit de fond et le taux de restitution du traceur être significatif (au minimum supérieur à 10 ou 20 %).

1.4. - TRACAGES EN ECOULEMENT RADIAL CONVERGENT

Les traçages à injection instantanée en écoulement radial convergent induit par pompage correspondent à la configuration la plus utilisée pour répondre aux problèmes rencontrés. Ils présentent plusieurs avantages pratiques sur les traçages en écoulement naturel :

- la convergence des écoulements en aval de l'injection permet de suivre la restitution de la totalité du traceur à partir d'un seul point d'observation ;
- l'accélération des écoulements induite par le pompage permet de diminuer les temps de l'expérimentation ;
- un traçage en écoulement radial convergent peut être fait conjointement à un pompage d'essai ;
- pour l'établissement des périmètres de protection, ils correspondent à la configuration réelle à étudier.

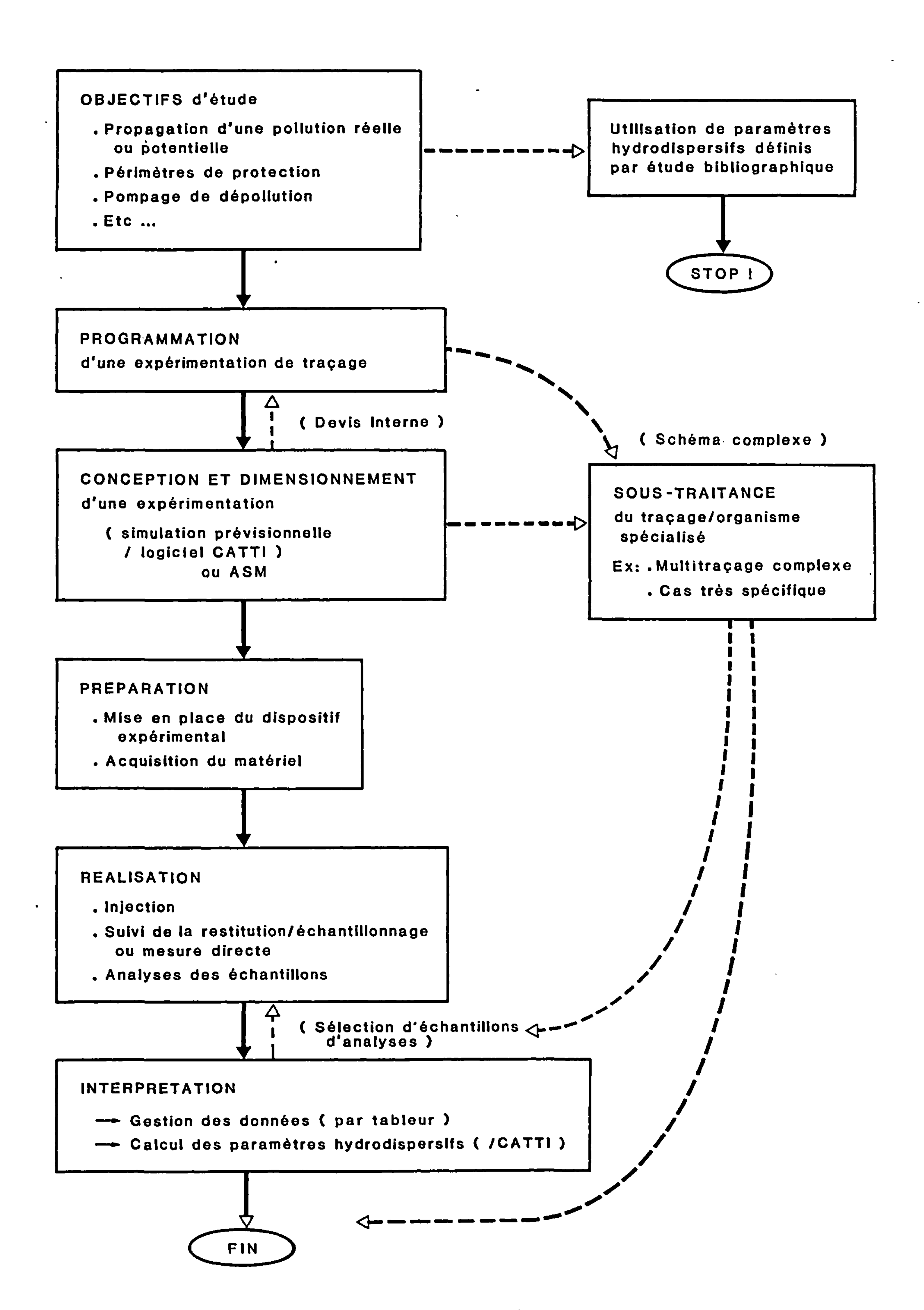


Fig.1 - DEROULEMENT SCHEMATIQUE D'UNE OPERATION DE TRAÇAGE

Cependant, les traçages en écoulement radial convergent ne permettent pas d'accéder au paramètre de dispersion transversale (αT), cette grandeur pouvant toutefois, dans bien des cas, être estimée à partir de αL, en prenant un rapport $\alpha T/\alpha L$ compris entre 5 et 10 % [3].

Un rappel théorique sur les transferts en écoulement radial est donné en annexe 3, incluant un abaque de calcul manuel des paramètres hydrodispersifs.

1.5. - TRACAGES EN ECOULEMENT NATUREL UNIFORME

Les traçages en écoulement naturel uniforme permettent d'accéder théoriquement au paramètre de dispersion latérale, en plus de la dispersion longitudinale et de la porosité cinématique. Toutefois, ces expérimentations sont généralement beaucoup plus lourdes à mettre en oeuvre que les traçages en écoulement radial convergent ; elles ne devront être envisagées que dans certaines situations particulières :

- dans l'impossibilité de réaliser un pompage pendant toute la durée d'une expérimentation,
- pour des études de pollution pour lesquelles la dispersion latérale revet une importance particulière.

Les contraintes spécifiques à ce type d'expérimentation sont :

- une parfaite connaissance du sens d'écoulement déduit de la piézométrie,
- la mise en place et le suivi de plusieurs points de surveillance en aval de l'injection (3 à 4 au minimum), répartis perpendiculairement à l'axe d'écoulement présumé.

Pratiquement, les inconvénients majeurs de ce type de traçage sont :

- la multiplicité des points de surveillance à mettre en place sur le terrain, à échantillonner et à analyser,
- la difficulté d'automatiser les prélèvements pour des piézomètres ayant un niveau statique inférieur à 7 m (hauteur limite de l'aspiration des préleveurs ISCO),
- la difficulté de calculer le taux de restitution du traceur.

1.6. - TRACEURS UTILISES

Il existe une synthèse bibliographique très complète réalisée par le BRGM sur les propriétés des différents traceurs utilisables [4]. De cette synthèse, et surtout de la longue expérience d'organismes spécialisés dans les traçages tel que le CENG (Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble), il ressort que l'Iodure (injecté sous forme d'Iodure de Sodium) est un des meilleurs traceurs existants, exception faite des traceurs radioactifs.

Ses principaux avantages sont :

- sa faible teneur dans les eaux naturelles (généralement quelques ppb),
- son absence de toxicité,
- sa faible adsorption sur les formations argileuses,
- sa facilité d'utilisation.

Toutefois, en temps que traceur chimique, cet élément est invisible et difficilement détectable directement sur le terrain (sauf matériel spécifique). Pour cette raison, l'injection d'Iodure est fréquemment couplée à l'injection d'un traceur fluorescent tel que la rhodamine B par exemple, de manière à pouvoir visualiser la restitution du traceur. Cette double injection n'est toutefois pas nécessaire dans tous les cas.

Remarques :

1) La rhodamine peut également être utilisée de manière différente, en pré-traçage, pour une première estimation des vitesses de transfert (peu d'intérêt) ou pour tester préalablement le bon fonctionnement du piézomètre d'injection (plus intéressant).

2) Dans certains cas, l'emploi simultané de traceurs colorants et d'Iodure peut occasionner des problèmes analytiques pour la détermination des concentrations d'Iodure dosé par colorimètrie.

2 - CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE OPERATION DE TRACAGE

La conception et le dimensionnement d'une opération de traçage consistent à définir :

a) le schéma hydrodynamique de l'expérimentation (écoulement libre ou radial convergent),

b) le nombre de points d'injection et le choix des traceurs s'y rapportant,

c) un dispositif d'injection du(des) traceur(s),

d) les quantités de traceur à injecter,

e) un dispositif de surveillance de la restitution (piézomètre, forage, pompage),

f) un plan d'échantillonnage (moyen de prélèvement, fréquence, durée),

g) un plan d'analyse des échantillons.

Cette phase de réflexion est capitale dans la mesure où elle conditionnera dans une large mesure la réussite technique et financière de l'opération de traçage.

Le choix du schéma hydrodynamique et du nombre de points d'injection reste fonction du problème posé et des moyens budgétaires disponibles (cf § 1.3).

Les points d) à g) seront définis à partir de simulations prévisionnelles en utilisant le logiciel CATTI du BRGM, en estimant les paramètres hydrodispersifs du milieu, d'après les connaissances hydrogéologiques régionales de l'aquifère. Pour réaliser ces simulations, il importe de considérer des hypothèses hautes et basses de manière à ce que la réalité ait le maximum de chance d'être inclue dans cet intervalle.

Pour des cas d'écoulement plus complexe, d'autres logiciels de modèle maillé, simple d'utilisation, tel que ASM (Aquifère Simulation Modèle) peuvent également être utilisés.

En pratique, pour les calculs prévisionnels, on retiendra que :

- la porosité cinématique est peu différente de la porosité efficace, elle-même assimilable au coefficient d'emmagasinement pour les nappes libres,

- le taux de restitution de l'Iodure en écoulement radial convergent est généralement compris entre 20 et 70 % (prendre 20 % pour se placer dans un cas pessimiste),

- il est souhaitable d'adopter des coefficients de sécurité de 50 à 200 % pour les quantités de traceurs à utiliser et les durées de prélèvements, compte tenu des imprévus possibles.

3 - MISE EN OEUVRE DU TRACAGE

3.1. - PREPARATION PREALABLE A L'INJECTION

Au bureau

- acquisition du(des) traceur(s)* (attention aux délais),
- préparation de la (des) solution(s) à injecter dans un (ou plusieurs) jerrican(s) (permet de s'affranchir des conditions météorologiques rencontrées sur le terrain)

  Remarque : l'iodure de sodium, la rhodamine et l'uranine sont disponibles sous forme soluble dans l'eau.

- acquisition du flaconnage de prélèvement*
- acquisition du matériel de prélèvement*
  - préleveur automatique programmable (type ISCO) (tester le bon fonctionnement de l'appareil... et de ses batteries !)
  - préleveur type "godet" ouvert ou fermé (pour prélèvement au fond)
- acquisition éventuelle d'un fluorimètre de terrain pour le dosage in situ de la rhodamine
- réservation d'un créneau d'analyse avec le laboratoire retenu pour le dosage du traceur chimique*
- acquisition de gants jetables et de sacs poubelles pour le stockage ou rejet des récipients de rhodamine

Sur le terrain

- mesurer (ou estimer) le bruit de fond naturel des teneurs du traceur avant l'injection
- mise en place d'un dispositif piézométrique de mesure
- préparation d'un dispositif de pompage en circuit fermé sur le point d'injection

---

* Cf. références techniques en annexe 4.

3.2. - INJECTION DU TRACEUR

Avant l'injection, mesurer le niveau piézométrique et la conductivité de l'eau et prélever deux échantillons "blancs".

Mode d'injection

Après avoir été mis préalablement en solution, le traceur est déversé dans l'ouvrage d'injection. La concentration en traceur de la colonne d'eau de l'ouvrage est ensuite homogénéisée par un pompage en circuit fermé, le temps de l'évacuation de l'essentiel du traceur (généralement une à quelques heures) (cf. schéma de la figure 2).

Si l'ouvrage d'injection est de suffisamment bonne qualité, le traceur quittera naturellement la colonne d'eau du forage pour se répandre dans l'aquifère sans qu'il ne soit besoin de "pousser" ou "chasser" le traceur par adjonction d'un volume d'eau supplémentaire dans l'ouvrage.

La pratique d'adjonction d'eau dans le piézomètre a deux inconvénients majeurs :

- elle peut occasionner une perturbation artificielle des écoulements en modifiant les gradients hydrauliques (phénomènes particulièrement importants pour les milieux à faible perméabilité) ;

- en l'absence d'un pompage d'homogénéisation en circuit fermé, l'eau injectée dans l'ouvrage ne parvient généralement pas jusqu'au fond, elle occasionne alors une dilution de la partie supérieure de la colonne d'eau et contribue par conséquent à créer un gradient vertical de concentration en traceur.

Cette pratique d'adjonction d'eau est donc déconseillée, sans toutefois être proscrite. Il est évident que l'importance relative de ces perturbations tend à diminuer quand le rapport distance injection-restitution/épaisseur de l'aquifère augmente. En effet, dans certaines situations, en cas d'impossibilité de réaliser un pompage en circuit fermé (piézomètre à faible diamètre, avec niveau d'eau inférieur à 6 m, défaillance du matériel de pompage, etc...), ou si l'on est contraint de travailler sur un ouvrage pouvant être partiellement colmaté, l'adjonction d'eau pour pousser le traceur peut être envisagée. Deux précautions élémentaires doivent alors être prises :

- contrôler les niveaux d'eau de l'ouvrage d'injection avant, pendant et après l'injection, de manière à pouvoir quantifier la perturbation hydraulique occasionnée et en tenir compte dans les interprétations si besoin était ;

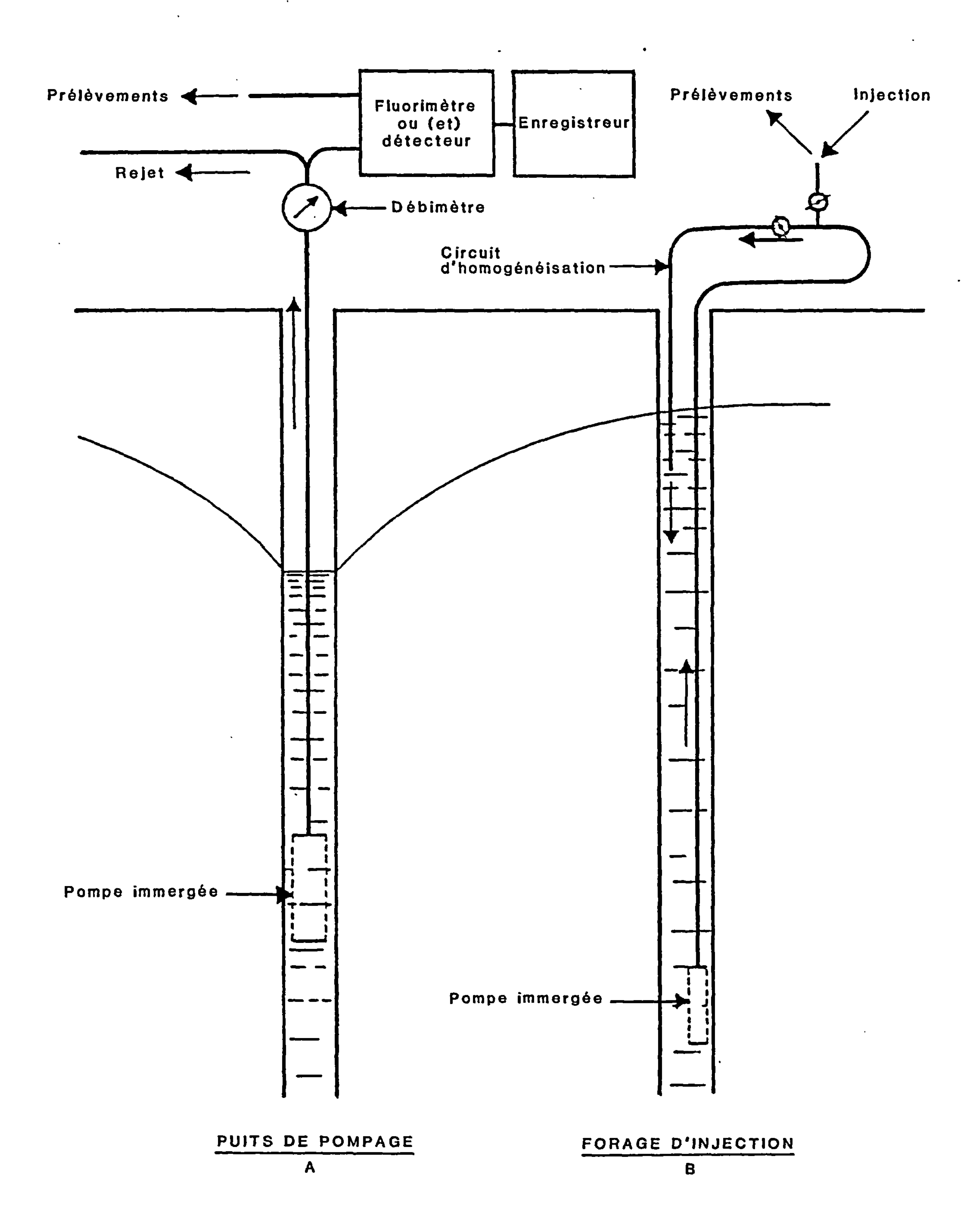


Fig.2 - SCHEMA DE PRINCIPE DES TRAÇAGES EN ECOULEMENT RADIAL CONVERGENT

(in rapport BRGM 80 SGN 855 EAU)

- contrôler l'évacuation du traceur par des prélèvements dans l'ouvrage d'injection à deux profondeurs minimum (surface et fond), afin de pouvoir apprécier l'effet de dilution de la partie supérieure de la colonne d'eau.

Contrôle du départ du traceur dans l'aquifère

Des prélèvements et analyses d'eau régulièrement espacés dans le temps permettront de contrôler (généralement a posteriori) le départ du traceur dans l'aquifère.

Le taux de traceur évacué à un instant t étant :

$$T_t\ (\%) = \frac{\text{masse évacuée}}{\text{masse injectée}} \times 100$$

$$T_t\ (\%) = \left[\frac{Mi - (C°_t * h * \pi * R^2)}{M_i}\right] \times 100$$

avec Mi : masse de traceur injectée (kg)

h : hauteur de la colonne d'eau contenant le traceur (m)

R : rayon intérieur de l'ouvrage d'injection (m)

$C°_t$: concentration en traceur à l'instant t dans la colonne d'injection (kg/m³ ou g/l)

Sur le terrain, l'évacuation du traceur chimique peut être contrôlée par un suivi de la conductivité dans l'ouvrage d'injection.

3.3. - SUIVI DE LA RESTITUTION

Echantillonnage

Le plan d'échantillonnage est défini à partir des simulations prévisionnelles (cf. § 2). Il est conseillé de faire de nombreux prélèvements, quitte à ne pas tous les analyser systématiquement.

Pour optimiser le suivi de la restitution, il importe de tenir compte du fait que si le traceur arrive rapidement, la courbe de restitution peut être limitée dans le temps. A l'inverse, si les premières particules du traceur n'arrivent qu'au bout de deux à quelques jours, la restitution s'étalera forcément sur une période plus longue.

En pratique, il est donc recommandé de faire évoluer la fréquence des prélèvements au cours du temps, en faisant des prélèvements rapprochés au début, puis progressivement de plus en plus espacés.

Exemple : Pour un préleveur automatique d'une autonomie de 24 bouteilles, la première fréquence de prélèvement pourra être de 3 h (x 24) pendant les 3 premiers jours, puis de 6 h (x 24) pendant les 6 jours suivants, etc...

Analyse des échantillons

Pour optimiser le nombre d'analyses, il est conseillé de procéder en deux temps :

- faire un premier "balayage" de la série en faisant analyser un échantillon sur deux ou sur trois (selon la fréquence des prélèvements) ;

- après examen des premiers résultats et repérage du passage du traceur, faire analyser des échantillons supplémentaires dans les périodes intéressantes de la restitution.

Remarque : *Attention de bien envoyer tous les échantillons au laboratoire de manière à pouvoir commander par simple téléfax les nouvelles analyses à effectuer dès réception des premiers résultats.*

4 - INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1. - GESTION DES DONNEES

Selon les types de traçage, la gestion des données (échantillons prélevés et/ou analysés) peut être plus ou moins complexe.

Pour cette opération, l'emploi d'un tableur est vivement recommandé ; outre la mise au propre des résultats, il permet :

- une visualisation graphique des résultats,
- l'utilisation des fonctions calendaires,
- une automatisation de certains calculs (moyenne de concentrations à profondeurs différentes, taux d'évacuation du traceur, etc...).

4.2. - CALCULS DES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS

Le calcul des paramètres hydrodispersifs est réalisé avec le logiciel CATTI du BRGM [3] par ajustement de la courbe expérimentale avec une courbe théorique. Une illustration des possibilités du logiciel CATTI est donnée en annexe 5.

En écoulement radial convergent, le taux de restitution est également calculé par ajustement de la surface de la courbe de restitution, avec le logiciel CATTI.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] A. LALLEMAND-BARRES, P. PEAUDECERF (1978) - "Recherche des relations entre la valeur de la dispersivité macroscopique d'un milieu aquifère, ses autres caractéristiques et les conditions de mesure - Etude bibliographique" - Bulletin du BRGM (2ème série), section III, n° 4. p. 277-284.

[2] J.P. SAUTY, W. KINZELBACH - Computer Aided - Tracer Tests Interpretation - Mode d'emploi de CATTI version 2.0 mai 1988 - Rapport BRGM 89 SGN 217 EEE.

[3] J.P. SAUTY (1977) - "Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçages" - Thèse de docteur ingénieur, Université de Grenoble, 157 p.

[4] A. LALLEMAND-BARRES (1984) - Traceurs artificiels en hydrogéologie - Rapport BRGM 84 SGN 319 EAU - 66 p.

[5] J.P. SAUTY (1987) - Utilisation des traceurs pour définir les périmètres de protection - Rapport BRGM 87 SGN 287 EAU.

A N N E X E 1

RAPPELS SUR LA NOTION DE DISPERSIVITE D'UN MILIEU POREUX

d'après la référence bibliographique [1]

Rappels sur la notion de dispersivité d'un milieu poreux

Les transferts en milieu poreux saturés de substances miscibles à l'eau sont régis par les deux phénomènes fondamentaux : convection et dispersion. En écoulement convectif-dispersif, la distribution des concentrations vérifie les équations aux dérivées partielles de la forme :

$$\operatorname{div}\,(\overline{\overline{D}} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}\ C) - \operatorname{div} uC = \frac{\delta C}{\delta t}$$

ou, pour un écoulement uniforme dans un espace bidimensionnel siège d'un écoulement parallèle à la direction Ox :

$$D_L \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} + D_T \frac{\delta^2 C}{\delta y^2} - u \frac{\delta C}{\delta x} = \frac{\delta C}{\delta t}$$

où C est la concentration de la solution, u est la vitesse effective de pore égale à $\frac{V}{\omega}$ où V est la vitesse de Darcy et ω est la porosité cinématique

$$\overline{\overline{D}} \text{ est le tenseur de dispersion } = \begin{vmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{vmatrix}$$

D_L est le coefficient de dispersion longitudinale

D_T est le coefficient de dispersion transversale.

Le phénomène de dispersion est la somme de deux effets :

- la diffusion moléculaire D_m
- la dispersion cinématique provoquée par le mouvement de l'eau.

Aussi, écrit-on :

$D_L = \alpha_L u + D_m$
et $D_T = \alpha_T u + D_m$

où α_L et α_T sont des paramètres qui ne dépendent que du milieu poreux. Ce sont les coefficients de dispersion intrinsèque [réf. *b*] ou dispersivité :

- α_L dispersivité longitudinale,
- α_T dispersivité transversale.

Comme l'ont montré les travaux de PFANNKUCH, pour la gamme des vitesses pratiquement rencontrées dans les aquifères naturels, le coefficient de dispersion longitudinale D_L est proportionnel à la vitesse, le terme de diffusion moléculaire étant négligeable devant la dispersion cinématique : $D_L = \alpha_L u$.

Références de l'annexe

[*a*] FRIED J.J., COMBARNOUS M.A. (1971). — Dispersion in porous media. In: Advances in hydroscience, New York, London, Academic Press, 7, pp. 169-282.

[*b*] CASTANY G., MARGAT J. (1977). — Dictionnaire d'hydrogéologie. BRGM, Orléans.

[*c*] PFANNKUCH H.O. (1963). — Contribution à l'étude des déplacements de fluides miscibles dans un milieu poreux. *Rev. Inst. fr. pétrole*, **18**, n° 2, pp. 215-270.

A N N E X E 2

VALEUR DES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS DE DIFFERENTS TYPES D'AQUIFERES

d'après la référence bibliographique [1]

TABLEAU I. — Traçage en milieu poreux

Milieu	Perméabilité (m/s)	Epaisseur de l'aquifère (m)	Hétérogénéité apparente	Distance (m)	Type d'écoulement	Vitesse moyenne (m/s)	Traceur	Dispersivité α (m)	Porosité cinématique	Réf.
Sable (Albien)	—	10	—	—	puits unique	—	chaleur	0,13	—	3 et 22
Sable (Sparnac.)	—	30	—	—	puits unique	—	chaleur	0,45	—	3 et 22
Sables et graviers	—	—	—	3 500	naturel	—	Fluoresceine	6	—	4 et 23
Sables et graviers	—	—	—	4 000	naturel	—	Fluoresceine	480		4 et 26
Sables gravier et galets	—	12	—	6	radial divergent	9,6	ClNa	11	—	5
Sable	1,5 à $3 \cdot 10^{-5}$	2,5	bistrate	5 à 6	radial convergent	3,1		0,18	0,24	10
Sable	$3 \cdot 10^{-4}$	3 à 4	—	13	uniforme forcé	2,7	INa	0,8	—	12 et 21
				13	—	1	H^3	1,3	—	
				13	—	2,4	I^{131}	0,7	—	
				26	—	1	—	2,2	—	
				33,2	—	2	—	1,9 (ατ = 0,11)	—	
Grès	$3 \cdot 10^{-5}$	31	—	{ 3 6	radial divergent	—	Br^{82}	{ 0,31 0,16 et 0,38	0,39 0,32 et 0,48	14
				{ 3 6	radial convergent	—	{ Rhod.WT Cl Li IK	0,60 0,60	0,48 0,36	
Argile sableuse	—	—	—	100	naturel		Sr^{90}	40 (α_τ = 7,5)	—	15
Sable	1	7	strates	8	doublet		Cr^{51}	0,50	—	17
Basalte et sédiments	—	78	strates	500 env.	naturel	2,1	{ ClNa H^3 Sr^{90}	91 (α_τ = 137)	—	19
Argile, sable et graviers	$1{,}5 \cdot 10^{-2}$	2	bistrate	9,3	radial convergent	18	INa	6,9	0,14	20 et 21
Argile, sable et graviers	$6{,}5 \cdot 10^{-3}$	{ 1 4,9	bistrate	5,3	radial convergent	{ 11,5 3,8	INa	{ 0,3 0,7	{ 0,21 0,18	20 et 21
Argile, sable et graviers	$2{,}1 \cdot 10^{-2}$	{ 8,6 3,4	multistrate	10,7	radial convergent	{ 46,7 16,0	INa	{ 0,46 1,1	{ 0,018 0,059	20 et 21
Argile sable et graviers	—	12	multistrate	25	radial convergent	{ 125 100	INa	{ 11 1,25	—	21
			multistrate	50	radial convergent	{ 15,5 78	INa	{ 25 6,25	—	21
			multistrate	150	radial convergent	6,9	INa	12,5	0,08	21
Sable et argile	$5{,}5 \cdot 10^{-3}$	6,1	bistrate	18,3	radial convergent	29	I^{131} H^3	0,26	0,32	25 et 11

Tableau II. — Traçage en milieu fissuré

Milieu	Perméabilité (m/s)	Epaisseur de l'aquifère (m)	Hétérogénéité apparente	Distance (m)	Type d'écoulement	Vitesse moyenne (m/j)	Traceur	Dispersivité α (m)	Porosité cinématique	Réf.
Calcaire	—	50	multistrate	ordre du km	radial convergent		ClNa	60	0,35	1
Dolomie et calcaires	transmissivité (5 à 11 · 10^{-2} m^2/s)		bicouche	122	doublet	0,14 à 3,4	H^3 et Rhod. WT	porosité × épaisseur = 0,88 m		2
Craie	—	—	—	—	—	—	—	12	—	4
Craie	—	—	—	—	—	—	—	50	—	4 - 26
Dolomie	3,4 · 10^{-3}	9 à 12	—	54	doublet	—	H^3	38,1	0,12	6
Dolomie	—	100	—	250	radial convergent	4,4	$K^3Co^{60}(CN)_6$	6	0,034	7 - 11
Craie	2,2 · 10^{-3} 3,6 · 10^{-4}	—	bicouche	8	naturel	57,6 9,6	Br^{82}	3,1 1,0	0,0053 0,023	9
Dolomie	2,5 · 10^{-4} 4,7 · 10^{-4}	57	bicouche	22	radial convergent	7,5 et 100	I^{131}	44 à 110	0,06	10
Calcaire	1,1 · 10^{-4}	6 à 8	multicouche	27	radial convergent	10 10,8	Co^{58} (EDTA)	27 2,7	0,123	10
				41,5	radial convergent	8,6	Co^{58} (EDTA)	20,8	0,042	10
Dolomie	—	48	bicouche	21,3	radial convergent	60,1 22,7	—	2,1 2,1	0,024	10
Calcaire	10^{-2}	50	—	50	radial convergent	32,4	I^{131}	3,5	0,0084	11 - 13
Granite	(transm. = 6 · 10^{-5} m^2/s)	40	—	11,8	radial convergent	182	INa	0,8	porosité × épaisseur = 0,95 m por. ≃ 0,02	16
				11,8	radial convergent	2,7	NO_3Na	4,0	porosité × épaisseur = 0,59 por. ≃ 0,01	
				11,8	radial convergent	172	ClNa	1,5	porosité × épaisseur = 0,0065 por. ≃ 1,6 · 10^{-4}	
Schiste et gneiss	3,6 · 10^{-7}	120		538	doublet très éloigné	1,2	H^3	134	0,0008	24
Granite				22 51	radial	1,3 21,4	Sr^{85} Br^{82}	6,1 7,7		27

A N N E X E 3

RAPPEL THEORIQUE SUR LES TRANSFERTS EN ECOULEMENT RADIAL

(Extrait du rapport BRGM n° 87 SGN 287 EAU)

(Extrait du rapport BRGM n° 87 SGN 287 EAU)

TRANSFERTS EN ECOULEMENT RADIAL

1 - CONDITIONS DE VALIDITE DU SCHEMA

Par le terme radial, nous désignons, comme c'est la coutume, un écoulement qui est en fait **axisymétrique** dans l'espace à trois dimensions : écoulement à symétrie de révolution autour de l'axe d'un puits.

Si les vitesses sont constantes sur chaque verticale, l'écoulement est entièrement défini par sa projection horizontale. Dans ce cas, un écoulement axisymétrique autour d'un axe vertical devient radial si on le considère dans le plan horizontal.

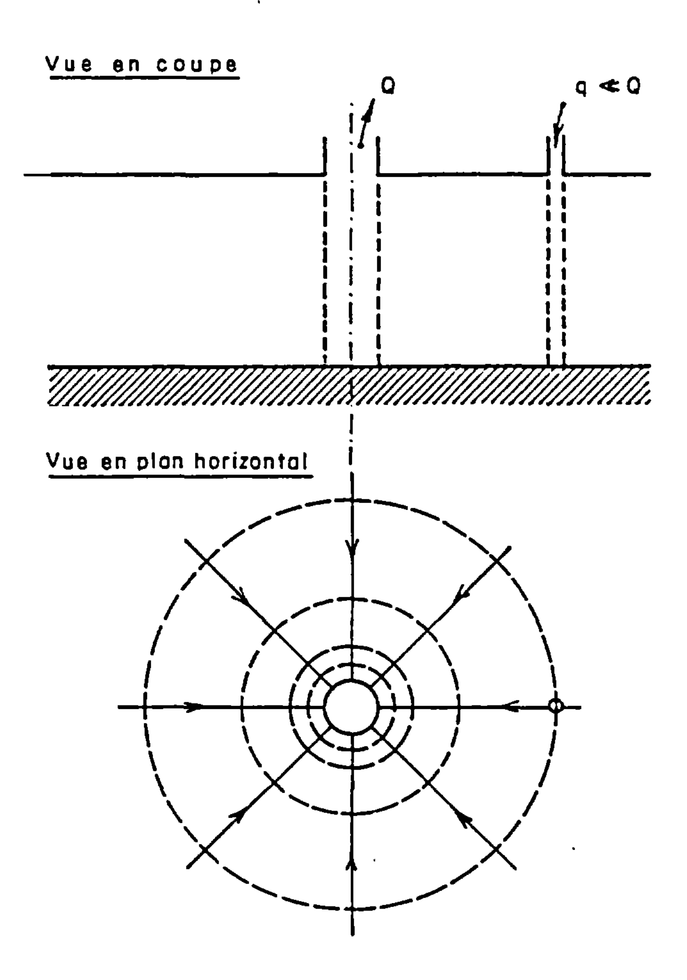


Figure A.8.1 - Schéma du dispositif de traçage en écoulement radial convergent

L'écoulement radial résulte du pompage dans un puits. A l'échelle considérée, les conditions aux limites doivent être suffisamment éloignées, l'écoulement régional faible et les hétérogénéités ainsi que l'anisotropie éventuelle peu marquées pour ne pas perturber l'axisymétrie de l'écoulement. La substance dont on étudie la propagation est injectée latéralement avec un flux suffisamment faible pour ne pas modifier non plus le champ des vitesses.

Ce schéma s'applique essentiellement pour interpréter les **traçages** dits "**en écoulement radial convergent**" avec injection rapide du traceur par un piézomètre latéral, sans toutefois créer de surpression à l'injection. C'est l'écoulement de la nappe à travers le piézomètre qui élimine le traceur en un temps de l'ordre de 1 heure alors que l'apparition à l'exhaure dans le puits central n'apparaît qu'à l'issue de un à plusieurs jours de pompage ; (dans le cas où les 2 durées seraient plus voisines, on pourrait encore utiliser la réponse impulsionnelle présentée ici mais à condition de la convoluer par la loi d'entrée (ce qui pour une utilisation pratique, signifie l'utilisation d'un ordinateur).

Ce schéma peut également être appliqué au cas d'une **pollution à proximité d'un captage.** Les concentrations calculées dans la nappe seraient alors variables sur la hauteur (plus forte en partie haute), puisque, à faible distance, le polluant n'aurait pas le temps de diffuser sur la totalité de la couche aquifère ; par contre,les concentrations au puits devraient être les mêmes.

2 - EQUATION AUX DERIVEES PARTIELLES

La combinaison de la **loi de Fick** (flux diffusif proportionnel au gradient) et de l'équation de continuité conduit, pour un écoulement piston-diffusion sans échanges, à l'équation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -u\frac{\partial C}{\partial r} + D_L\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{D_T}{r^2}\frac{\partial^2 C}{\partial \theta^2} \qquad (1)$$

avec

$$D_L = \alpha_L |u| \qquad D_T = \alpha_T |u| \qquad (2)$$

- Elimination du terme transversal

Quand l'écoulement est radial **convergent** (injection dans le piézomètre), le traceur va se disperser latéralement, mais les particules de traceur passées dans un tube de courant voisin vont se trouver entraînées vers le puits d'exhaure dans les mêmes conditions : la dispersion transversale n'apporte pas de retard à la date d'arrivée au puits central. Ce fait peut être facilement mis en évidence sur l'équation (1) à l'aide du changement de variable :

$$\boxed{\bar{C}(r,t) = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} C(r,\theta,t)\,d\theta} \qquad (3)$$

qui représente la concentration moyenne à la distance r du puits. A la distance R du centre, correspondant à la position du piézomètre d'injection, cette concentration est donnée par le rapport du flux massique injecté au débit total pompé.

Dans ces conditions, l'équation (1) s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -u\frac{\partial \bar{C}}{\partial r} + |u|\frac{\partial}{\partial r}\left(\alpha_L \frac{\partial \bar{C}}{\partial r}\right) \qquad (4)$$

ou encore, avec α_L uniforme :

$$\boxed{\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} = -\frac{A}{r}\frac{\partial \bar{C}}{\partial r} + \alpha_L \frac{|A|}{r}\frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial r^2}} \qquad (5)$$

avec :

$$A = \frac{Q}{2\,\P h\omega} \qquad (6)$$

Q = débit du puits central (< 0 en pompage : écoulement convergent).

h = épaisseur aquifère

ω' = porosité cinématique

α = dispersivité longitudinale.

- **Choix des variables sans dimension**

L'examen de l'équation différentielle (5) met en évidence la dépendance de la concentration C vis-à-vis des deux variables indépendantes, r et t, et des trois paramètres α, A et ε (ainsi que des deux conditions aux limites notées C_L).

$C = C(r,t,\alpha,A,\varepsilon,C_L)$ avec $C_L(t)$ = concentration sur la limite amont (7)

Distance réduite

On choisit $r_R = \dfrac{r}{\alpha}$ où α, coefficient de dispersivité, (8)

a la dimension d'une longueur.

Temps réduit

La durée de référence a été prise égale au temps t_C de transfert entre le puits central et le piézomètre périphérique (distance R), par convection pure :

$$t_C = \frac{\omega \pi R^2 h}{Q} = \frac{R^2}{2A} \tag{9}$$

D'où l'expression du temps réduit :

$$t_R = \frac{t}{t_C} = \frac{2At}{R^2} = \frac{Q}{\pi R^2 h \omega} t \tag{10}$$

L'équation (5), transposée en fonction de ces variables réduites, s'écrit :

$$\frac{2}{P} \cdot \frac{\partial C}{\partial t_R} = - \frac{\partial C}{\partial r_R} + \frac{\partial^2 C}{\partial r_R{}^2} \tag{11}$$

avec $P = R/\alpha$ nombre de Péclet = $(r_R)_{r=R}$

La courbe de restitution $C(t_R)$, obtenue pour $r_R = P$, ne dépend que du paramètre P ainsi, bien entendu, que des conditions aux limites.

3 - REPONSE A UNE IMPULSION DANS UN ECOULEMENT CONVERGENT

3.1 - ABAQUE

Le puits central est soumis à un pompage continu à débit constant. On introduit une masse m de traceur dans le piézomètre satellite. Cette masse passe rapidement dans l'écoulement qui ne doit pas être sensiblement perturbé par la surcharge éventuellement nécessaire à l'injection du traceur.

La figure A.8.2 présente les courbes de restitution au puits central pour des injections à différentes distances réduites $\frac{r}{\alpha}$. Elle a été réalisée à l'aide d'un modèle numérique.

3.2 - COMPARAISON ENTRE IMPULSION EN ECOULEMENT CONVERGENT ET LA DERIVEE DE LA REPONSE A UN ECHELON EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME

Les écarts entre la courbe de restitution à une injection brève en écoulement radial convergent et la dérivée de la réponse à un échelon imposé dans un écoulement monodimensionnel à vitesse uniforme sont rapportés figure A.8.3.

La courbe correspondante a pour équation :

$$C_R = \frac{K}{t_R^{1,5}} \, exp\left[-\frac{P}{4t_R}(1-t_R)^2\right] \qquad (12)$$

avec :

$$K = t_{Rmax}^{1,5} \, exp\left[-\frac{P}{4t_{Rmax}}(1-t_{Rmax})^2\right] \qquad (13)$$

où

$$t_{Rmax} = \sqrt{1+\left(\frac{3}{P}\right)^2} - \frac{3}{P} \qquad (14)$$

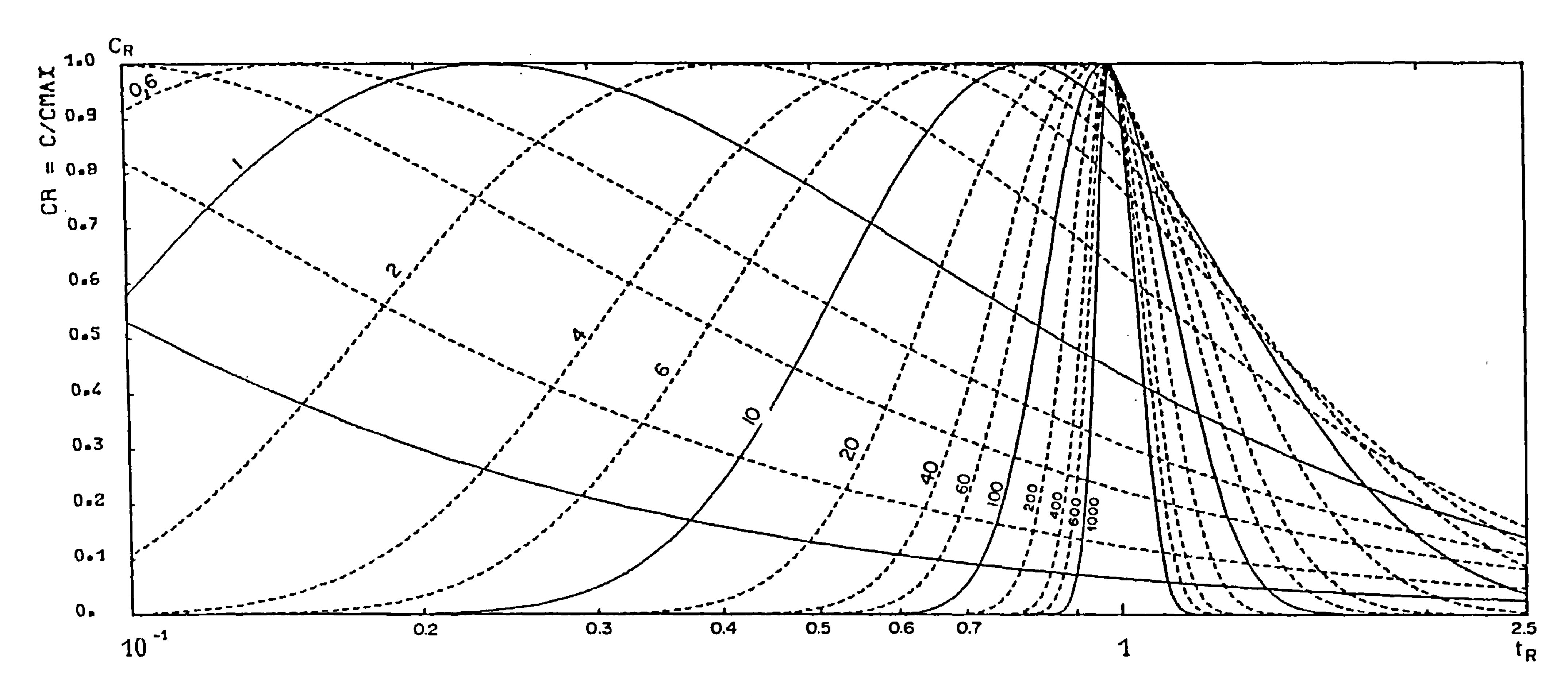


Figure A.8.2 - Abaque pour une injection instantanée dans un écoulement convergent

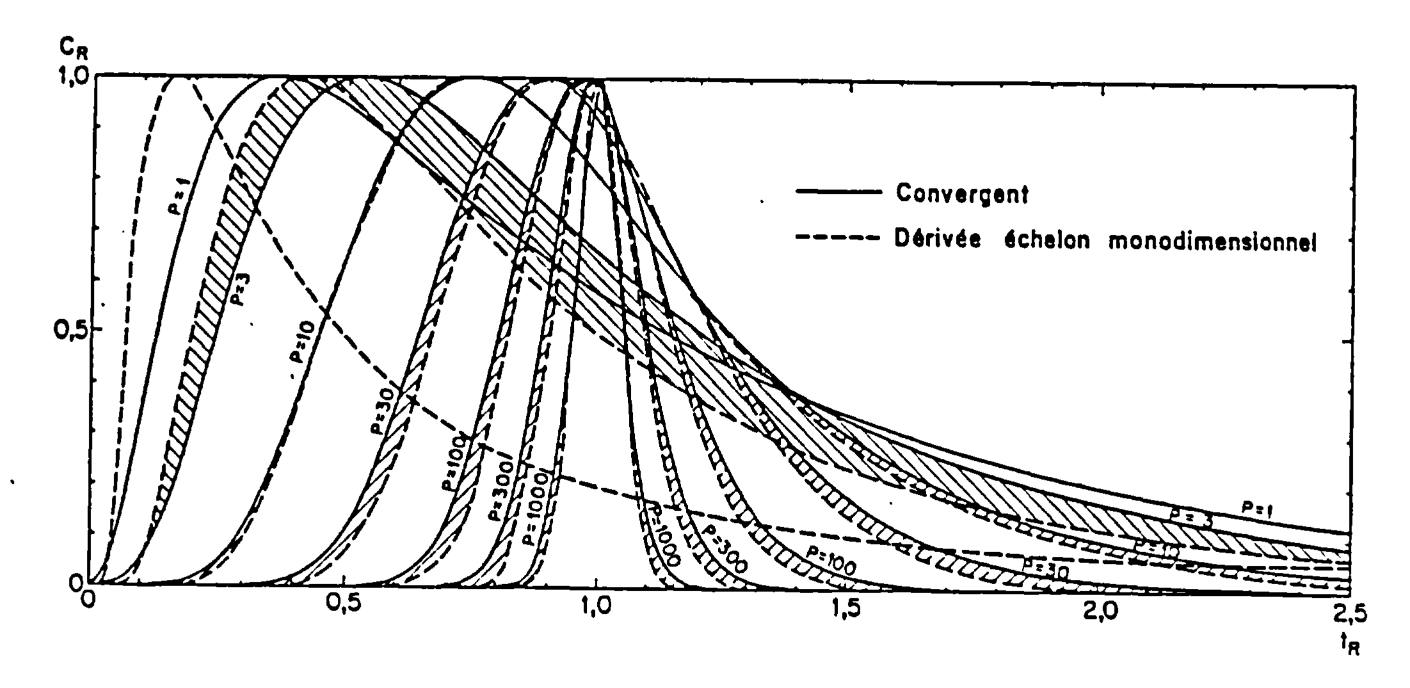


Figure A.8.3 - Impulsion brève en écoulement convergent : comparaison avec la dérivée de la réponse à l'échelon en écoulement monodimensionnel

Pour une valeur du paramètre P supérieure à 3, l'expression (12) fournit donc une formulation approchée de l'évolution des concentrations relatives $C_R = C/C_{max}$, aisément exploitable sur une calculatrice programmable ; l'amplitude réelle est calculée à partir de C_{max} (cf. A.8.3).

On observe une très bonne concordance tant que P > 3.

3.3 - COMPARAISON A L'ECHELON IMPOSE EN ECOULEMENT MONODIMENSIONNEL UNIFORME

Les écarts entre la restitution d'une injection continue en écoulement radial convergent et celle d'un échelon imposé en écoulement monodimensionnel uniforme (champ de vitesse uniforme et absence de dispersion transversale) sont mis en évidence par la figure A.8.4.

La courbe de restitution a pour équation dans ce dernier cas :

$$C_R = 0,5 \left(erf_c \frac{\sqrt{P}\,(1 - t_R)}{2\sqrt{t_R}} + exp(P)\,.\,erf_c \frac{\sqrt{P}\,(1 + t_R)}{2\sqrt{t_R}} \right)$$

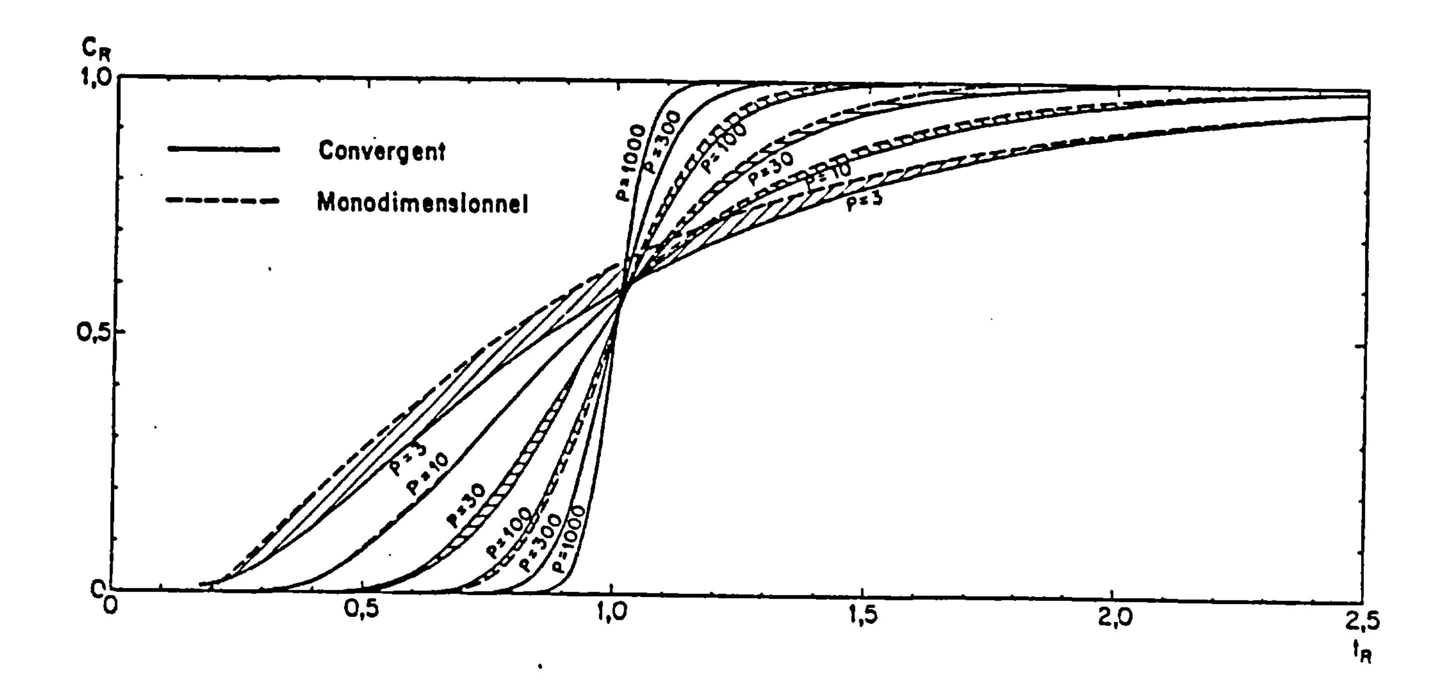


Figure A.8.4 – Injection continue en écoulement convergent : comparaison avec l'échelon monodimensionnel

On observe une très bonne concordance tant que P > 3.

4 - CALCUL DE LA CONCENTRATION MAXIMALE

Dans tous les cas, le pic de concentration est calculé dans l'hypothèse d'un schéma hydrodispersif pur. En réalité, des phénomènes destructeurs ou retardateurs tels que l'adsorption auront tendance à réduire l'amplitude réelle du pic. Cette évaluation va donc dans le sens de la sécurité ; elle est d'autant plus conservative que le comportement du produit étudié est éloigné de celui d'un traceur parfait.

La valeur du maximum de concentration est déduite des simulations numériques :

$$\boxed{C_{max} = \frac{m}{\pi R^2 h w} \cdot f(P)} \quad avec\ f(P) = \frac{1}{\int_o^\infty C_R \, dt_R} \qquad (15)$$

avec

- m : masse de soluté injectée
- R : distance entre points d'injection (axe du puits en écoulement divergent) et de mesure (axe du puits en écoulement convergent)
- h : épaisseur de l'aquifère
- ω : porosité cinématique
- P : nombre de Péclet (rapport R/α, avec α : dispersivité)
- f(P) : fonction du nombre de Péclet, obtenue par intégration numérique et représentée par la figure A.8.5.

4.1 - EXEMPLE D'APPLICATION

A 25 m d'un captage, 10 kg de substance nocive sont déversés de façon quasi-instantanée dans un aquifère de 3 m d'épaisseur, et pour lequel une expérience de traçage a indiqué une dispersivité de 3 m et une porosité efficace de 15 %. Le débit est suffisamment important pour qu'à 25 m de l'axe du puits, l'écoulement puisse encore, avec une bonne approximation, être considéré comme radial.

$$C_{max} = \frac{10}{\pi \cdot 25 \cdot 3 \cdot 0{,}15} f(25/3) = 0{,}011 . f(8{,}3)$$

La courbe de la figure A.8.5 indique que f(8,3) = 1,03 ; d'où :

$$C_{max} = 0{,}012 \text{ kg/m}^3 = 0{,}012 \text{ g/l}$$

$$\boxed{C_{max} \leq 10^{-2} \text{ g/l}}$$

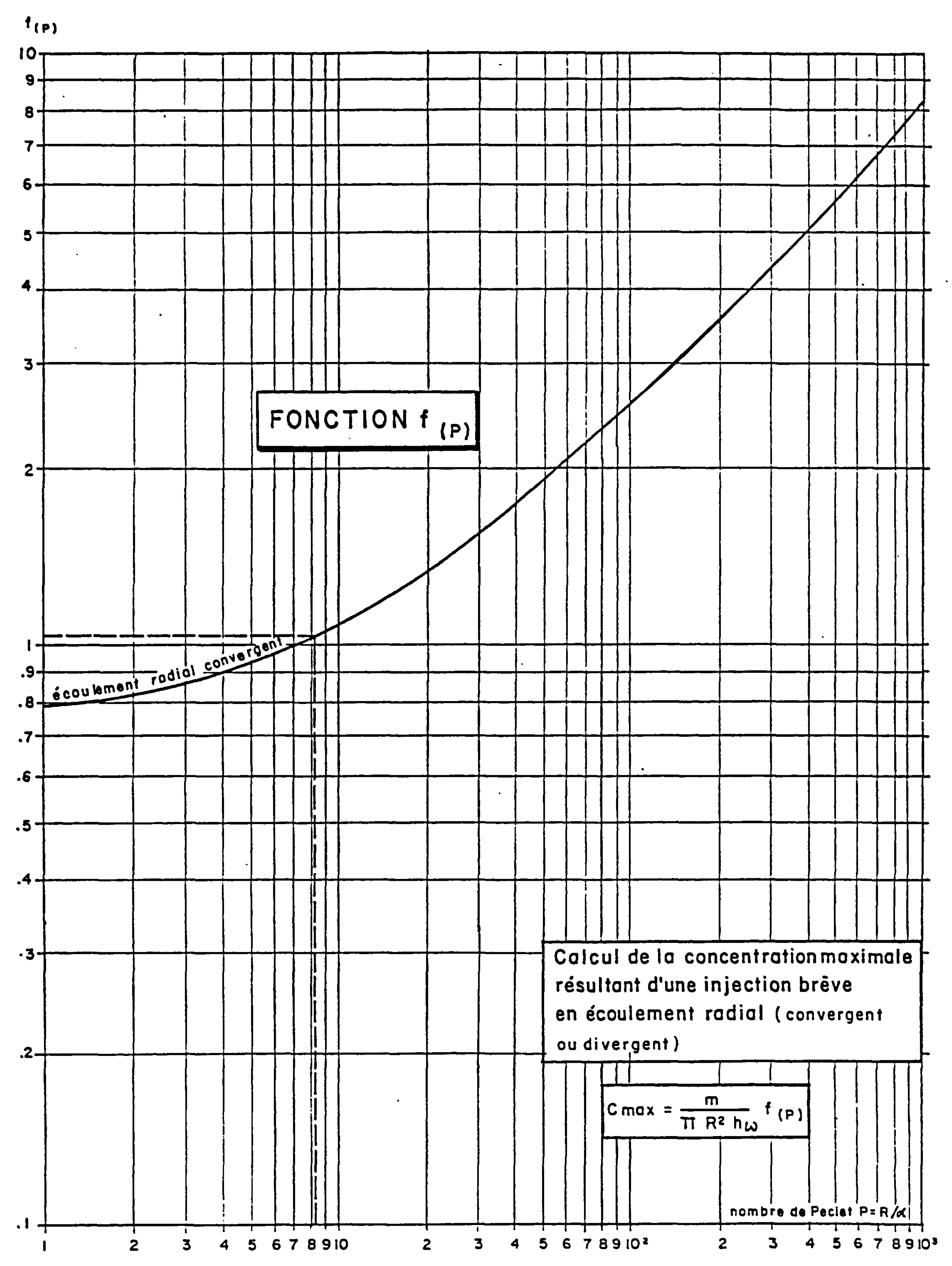

f (P)
FONCTION f (P)
écoulement radial convergent
Calcul de la concentration maximale résultant d'une injection brève en écoulement radial (convergent ou divergent)
$C_{max} = \frac{m}{\pi R^2 h \omega} f_{(P)}$
nombre de Peclet P = R/α

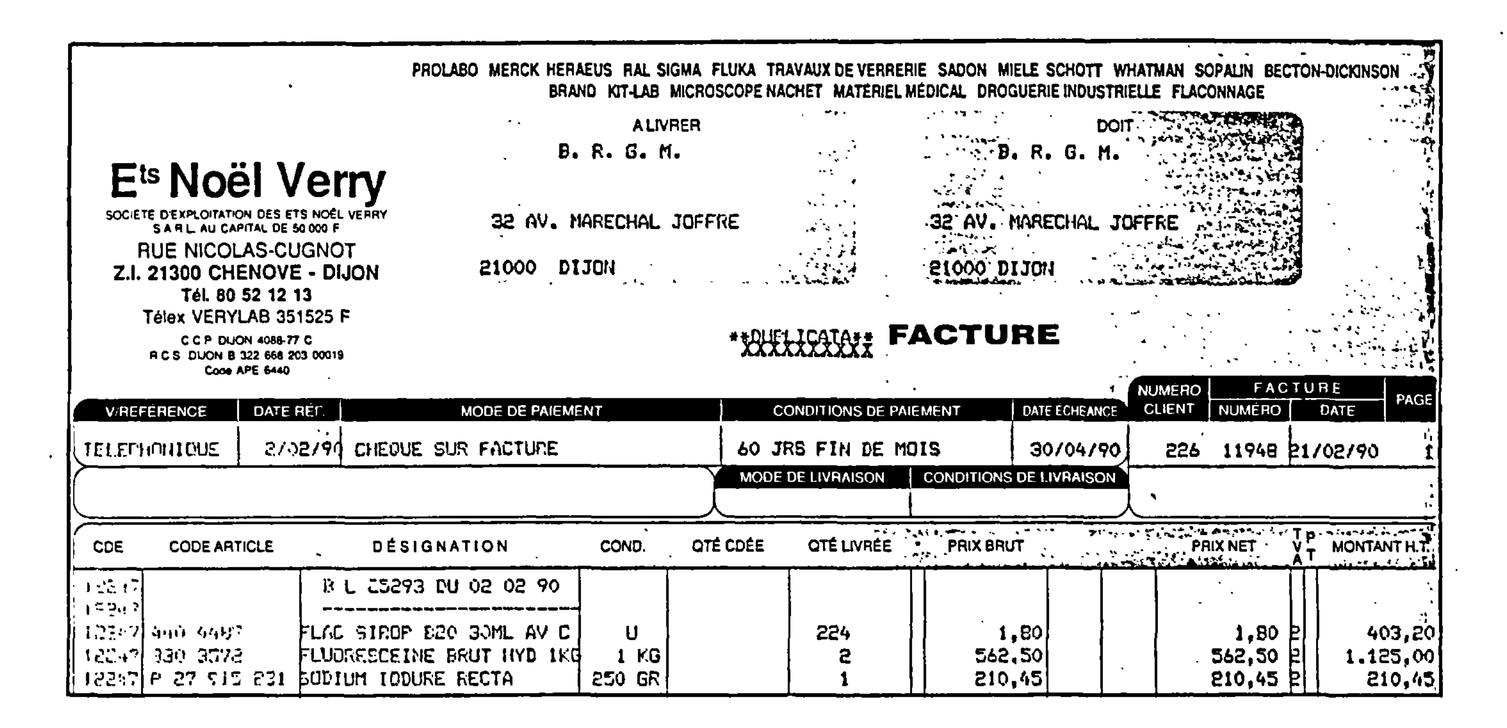
Figure A.8.5 –

A N N E X E 4

REFERENCES ET COUTS DE FOURNITURES ET PRESTATIONS LIEES AUX TRACAGES

Les tarifs sont donnés à titre indicatif pour l'année 1990.

<u>Flaconnage et traceurs</u> (exemple de fournisseur) :



PROLABO MERCK HERAEUS RAL SIGMA FLUKA TRAVAUX DE VERRERIE SADON MIELE SCHOTT WHATMAN SOPALIN BECTON-DICKINSON
BRAND KIT-LAB MICROSCOPE NACHET MATÉRIEL MÉDICAL DROGUERIE INDUSTRIELLE FLACONNAGE

Ets Noël Verry
SOCIETE D'EXPLOITATION DES ETS NOËL VERRY
S A R L AU CAPITAL DE 50 000 F
RUE NICOLAS-CUGNOT
Z.I. 21300 CHENOVE - DIJON
Tél. 80 52 12 13
Télex VERYLAB 351525 F
C C P DIJON 4086-77 C
R C S DIJON B 322 668 203 00019
Code APE 6440

A LIVRER
B. R. G. M.
32 AV. MARECHAL JOFFRE
21000 DIJON

DOIT
B. R. G. M.
32 AV. MARECHAL JOFFRE
21000 DIJON

DUPLICATA FACTURE

V/REFERENCE	DATE RÉF.	MODE DE PAIEMENT	CONDITIONS DE PAIEMENT	DATE ÉCHEANCE	NUMERO CLIENT	FACTURE NUMÉRO	FACTURE DATE	PAGE
TELEPHONIQUE	2/02/90	CHEQUE SUR FACTURE	60 JRS FIN DE MOIS	30/04/90	226	11948	21/02/90	1

MODE DE LIVRAISON	CONDITIONS DE LIVRAISON

CDE	CODE ARTICLE	DÉSIGNATION	COND.	QTÉ CDÉE	QTÉ LIVRÉE	PRIX BRUT	PRIX NET	TVA	PT	MONTANT H.T.
[illegible]		B L 25293 DU 02 02 90								
[illegible]										
[illegible]	400 4497	FLAC SIROP E20 30ML AV C	U		224	1,80	1,80	2		403,20
[illegible]	330 3372	FLUORESCEINE BRUT HYD 1KG	1 KG		2	562,50	562,50	2		1.125,00
[illegible]	P 27 515 231	SODIUM IODURE RECTA	250 GR		1	210,45	210,45	2		210,45

<u>Préleveur automatique</u> :

Les départements Eau et Environnement du BRGM disposent de plusieurs prélèveurs automatiques ISCO, programmables, d'une capacité de 24 flacons.

Responsable de la gestion des préleveurs : Z. ALAMY (dépt Env.)
Responsable technique des préleveurs : P. LEFEVRE (dépt Env.)

Forfait (révision + expédition) : 200 F + 400 F/semaine
Ces tarifs sont susceptibles d'être fortement augmentés prochainement.

<u>Analyses</u> :

DT/ANA est en mesure de réaliser les dosages d'iodure et (depuis peu) des colorants fluorescents. Si possible, réserver un créneau d'analyse avec eux avant de faire le traçage.

Prix unitaire : 75 F ou 45 F/échantillon pour des séries supérieures ou égales à 24.

A N N E X E 5

ILLUSTRATION DES POSSIBILITES DU LOGICIEL CATTI ET EXEMPLE D'APPLICATION

(notice explicative : rapport BRGM n° 89 SGN 217 EEE)

C A T T I 's Main Menu

Reading a previous data file
Simulation of breakthrough curve C(t)
Automatic identification
Opening a new data file
Adding a new piezometer record on an existing data file
Modifying an existing data file
Suppress a piezometer record from a data file
key:

Choosing the mathematical model

1D uniform flow * cst α * Dirac
2D uniform flow * cst α * Dirac
1D uniform flow * cst α * Dirac * 2 sites * numerical
2D uniform flow * var α * Dirac
2D uniform flow * cst α * angle ? * Dirac
Radially converging flow * Dirac * 1 site * Approximation
Radially converging flow * Dirac * two sites * numerical
key:
2D uniform flow * var α * Cont inj

02 July 1990 09:51

Parameters for Radially converging flow * Dirac * two sites * numerical

Transfer parameters			Exchange parameters (layer #1/2)		
X	Longit. distance	4.000E+01 m	F	Recovery factor	8.000E-01
			L	Decay factor	0.000E+00 /s
m	Mass injected tracer	4.400E-01 kg	k	Kinetics coefficient	1.000E-06 m/s
Q	Production flow rate	7.000E-04 m3/s			
Ω	Kinematic porosity	1.000E-01			
αL	Longit. dispersivity	8.000E-01 m			
			Ci	Initial noise	0.000E+00 kg/m3
h	Aquifer thickness	1.000E+01 m	Di	Initial delay	0.000E+00 s

Kinetics coefficient < 2/dt = 2.9245E-06 is satisfied
Dispersivity ≥ dx/2 = 6.122 (Numerical Peclet ≤ 2) is not satisfied

Concentrations (unit : 200 ppb I)
0
1
2
3
4
points expérimentaux
courbes théoriques
0
1
2
3
4
5
Time (unit = 2 days)

A N N E X E 6

EXEMPLES DE TRACAGES REALISES A L'AGENCE BRGM-BOURGOGNE

Trois exemples d'expérimentation de traçage sont présentés ci-après. Ils illustrent de façon non exhaustive les différentes finalités des traçages, les difficultés techniques pouvant être rencontrées et les résultats obtenus.

Ces expérimentations ne constituent en aucun cas des modèles de traçages parfaits, elles sont présentées à titre indicatif afin de se rendre compte des possibilités et des difficultés liées à ces prestations.

Les informations données ci-après proviennent d'études pour tiers, elles sont donc strictement CONFIDENTIELLES.

EXEMPLE 1 :

TRACAGES EN NAPPE ALLUVIALE DE LA SAVOUREUSE
ETUDE DE POLLUTION DECLAREE

Client : GEC-Alsthom Belfort

Prix de vente du traçage (hors équipement piézométrique) : 35 KF

Finalité :

Déterminer les caractéristiques hydrodispersives de la nappe pour pouvoir modéliser une pollution existante des eaux en vue de définir un système de pompage permettant le confinement de la pollution.

Expérimentation et résultats :

Réalisation de deux traçages consécutifs à l'iodure de sodium en écoulement radial convergent induit par pompage (cf. extraits des rapports numéros 89 SGN 624 FRC et R 30201 FRC 4S 89).

Commentaires :

- Problème de variation de débit du pompage rencontré lors de la première injection I_1 à 20 m du puits.
- Courbe de restitution très régulière étalée sur plus de trois mois pour l'injection I_2 faite à 100 m du puits.
- Bonne concordance des résultats entre les deux expérimentations.

ANNEXE 9

Expérimentation de traçage du 01/02/89
au voisinage du puits Bull

. conditions d'expérimentation

. résultats

. interprétation

(Extrait du rapport BRGM n° 89 SGN 624 FRC)

CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

Date d'injection du traceur : le 01/02/89 à 15h
Point d'injection du traceur : piézomètre PS4
Point de surveillance pour la restitution : puits Bull
Traceur utilisé : Iodure de sodium (suivi des ions I-)
Quantité injectée : 500 g d'Iodure de sodium, soit 425 d'I-
Distance entre point d'injection et point de surveillance : 20m
Hauteur mouillée de l'aquifère : 2,5 m
Conditions hydrauliques : écoulement radial convergent, engendré par le pompage sur le puits Bull (5 à 21 m3/h).

RESULTATS

La courbe de restitution du traceur observée sur le puits Bull est présentée sur la figure 9.1. Cette courbe a un aspect régulier unimodale, avec un pic très pointu apparaissant au bout d'un jour et demi. Contrairement aux souhaits que nous avions émis, le pompage effectué sur le puits Bull n'a pas pu être maintenu à un débit constant pendant la durée de l'expérimentation.
Il apparaît clairement que la partie ascendante de la courbe de restitution est largement influencée par la forte augmentation de débits, observée le deuxième jour de l'expérimentation.
Le taux de restitution du traceur a été calculé par intégration du flux d'Iodure mesuré, en fonction du temps, surs les huit jours de la restitution du traceur ; il est de 66%.
Ce taux de 66% est satisfaisant, il atteste d'une bonne représentativité de l'expérimentation.

INTERPRETATION

. Vitesse de circulation de l'eau

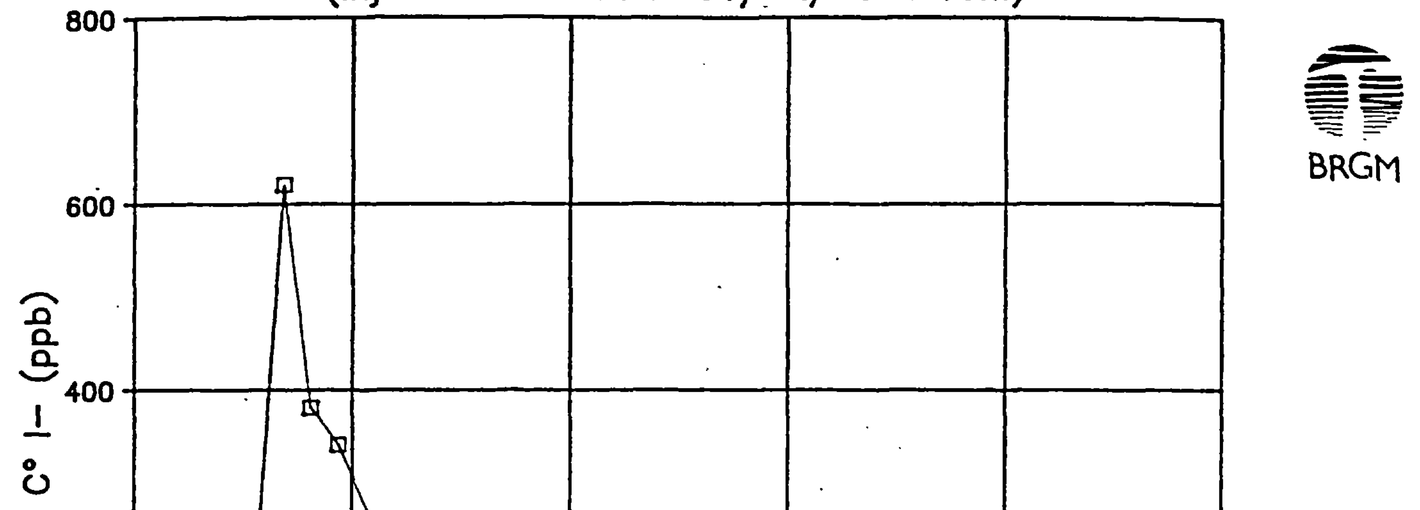
Le centre de gravité de la courbe de restitution apparaît environ 48h après l'injection. En conséquence, pour les conditions hydrauliques du moment, la vitesse moyenne de déplacement du traceur est de l'ordre de 10m/jour.

. Paramètres hydrodispersifs de l'aquifère

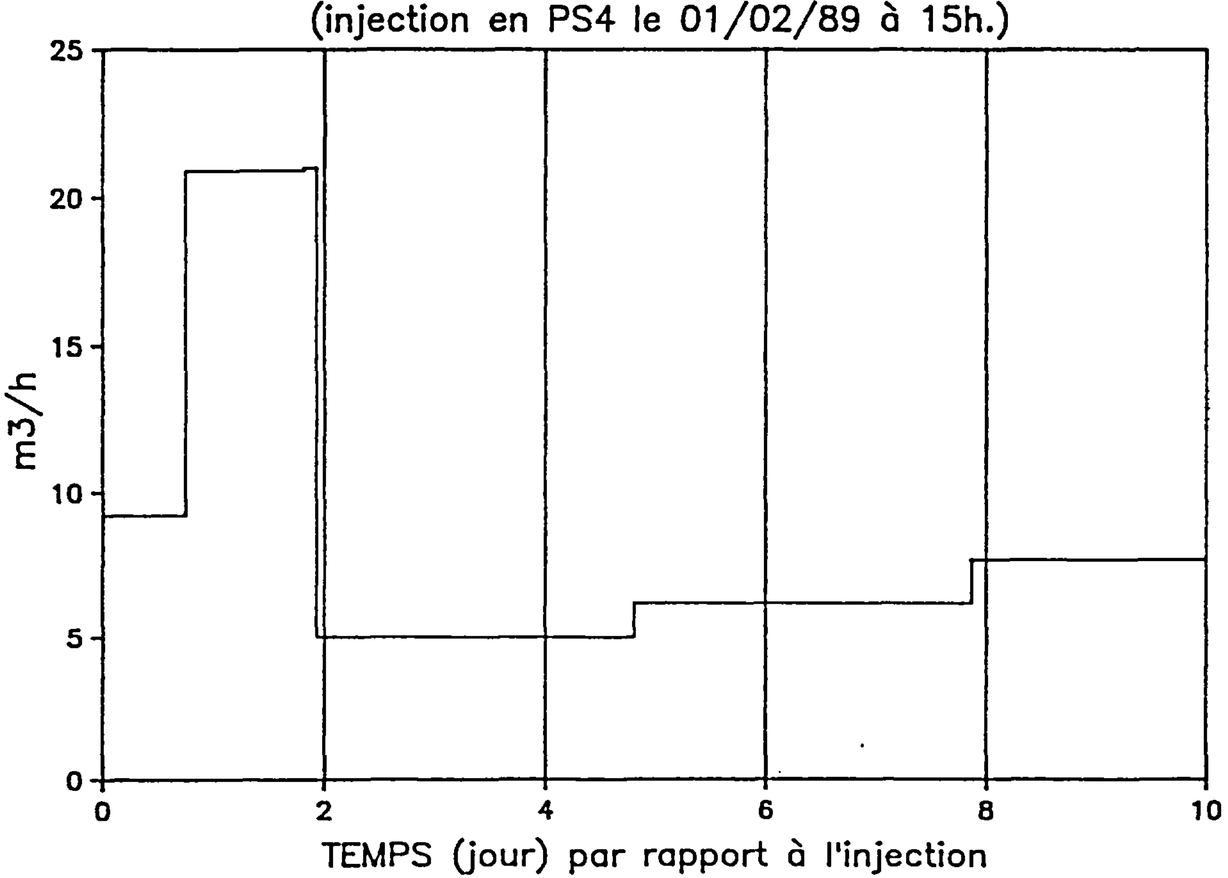
Les paramètres hydrodispersifs de l'aquifère (porosité cinématique et coefficient de dispersion longitudinal) ont été calculés à l'aide du logiciel CATTI (computer assisted interpretation of field tracer tests), développé au BRGM.
Aucun ajustement parfait d'une courbe théorique sur les points expérimentaux n'est possible, compte-tenu de l'allure de la courbe influencée par les variations de débits.
Un ajustement a néanmoins été recherché, en travaillant avec un débit moyen de 9,5 m3/h.
Pour minimiser l'effet de l'augmentation brutale du débit, le deuxième jour après l'injection, le calage des paramètres hydrodispersifs a plus spécifiquement été recherché sur la partie descendante de la courbe, sans chercher à ajuster le pic des concentrations observées.
Le calage retenu est présenté sur la figure 9.2, il aboutit aux valeurs des paramètres suivants :
Porosité cinématique (ω) = 15%
Coefficient de dispersion longitudinal = 3m

Figure 9.1

RESTITUTION DU TRACEUR AU PUITS BULL
(injection en PS4 le 01/02/89 à 15h.)



DEBITS POMPES AU PUITS BULL
(injection en PS4 le 01/02/89 à 15h.)



Concentrations (unit = 200 ppb l)

4
3
2
1
0

points expérimentaux

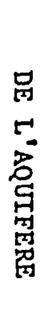
courbe théorique

0 1 2 3 4 5

Time (unit = 2 days)

. . . . (C) : OMEGA=20%, ALPHA=3m, R=40% Var = 1.4065E-07

———— (D) : OMEGA=15%, ALPHA=3m, R=40% Var = 1.2876E-07



CALAGE DES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS DE L'AQUIFERE

BRGM

Figure 9.2

ANNEXE 5

RESULTAT DU TRACAGE

EXPERIMENTAL I2,

REALISE LE 09 FEVRIER 1989

A PARTIR D'UNE INJECTION

EN PZ1

Extrait du rapport BRGM R 30201 (nov. 1989)

TRACAGE I2

CONDITIONS D'EXPERIMENTATION

Date d'injection du traceur : le 09/02/1989 à 12 h
Point d'injection du traceur : piézomètre PZ1
Point de surveillance pour la restitution : puits Bull
Traceur utilisé : Iodure de sodium (suivi des ions I-)
Quantité injectée : 4000g d'Iodure de sodium, soit 3400g d'I-
Distance entre point d'injection et point de surveillance : 100m
Hauteur mouillée de l'aquifère : 2,5 m.

RESULTATS

Le traçage I2 a fait suite au traçage I1 réalisé le 01/02/1989, a proximité du puits Bull. La courbe de restitution du traçage I2, observée sur le puits Bull est présentée sur l'annexe 5.1.

Cette courbe présente une allure très régulière, la restitution observée sur quatre mois n'est pas totalement complète. Le taux de restitution du traceur est de 29%.

INTERPRETATION

Les paramètres hydrodispersifs du milieu ont été recherchés à partir d'un calage d'une courbe théorique sur les points expérimentaux (cf. annexe 5.2). On en déduit une porosité cinématique de l'ordre de 17% et une dispersion longitudinale de 8m. Il est intéressant de constater que ces paramètres sont très proches de ceux calculés à l'occasion du traçage I1, dont la distance d'injection n'était que de 20m. La concordance de ces valeurs attestent une bonne fiabilité des résultats.

RESTITUTION DU TRACEUR AU PUITS BULL

(injection I2 en PZ1 le 09/02/89 à 12h.)

C° I— (ppb)

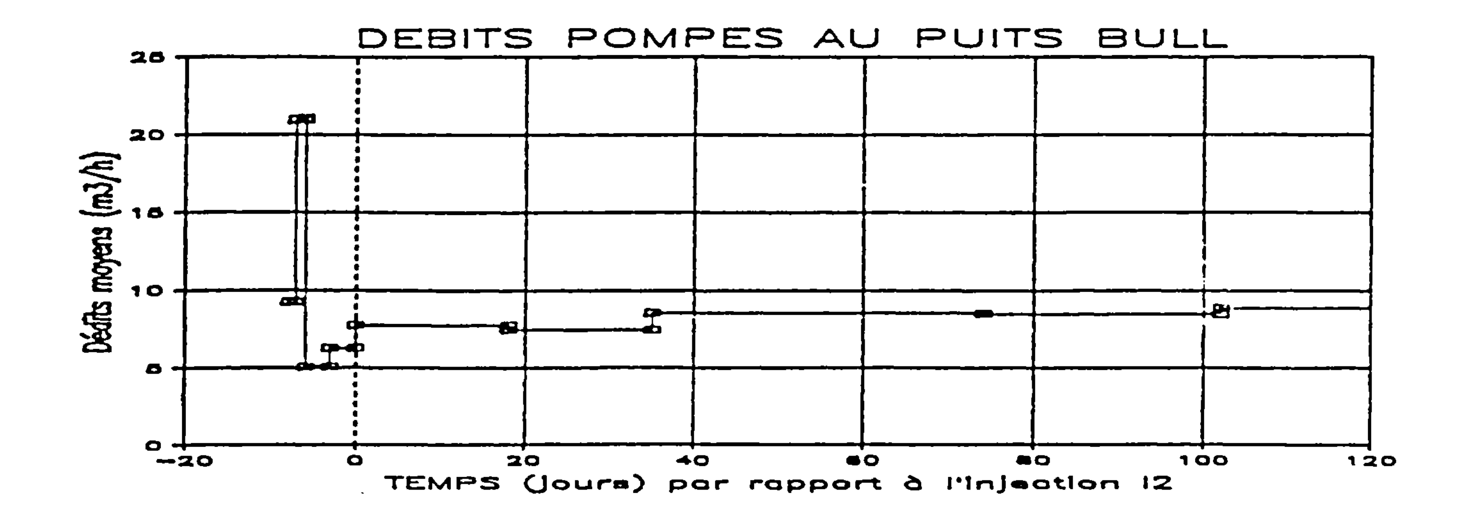
200
175
150
125
100
75
50
25
0

620 ↑

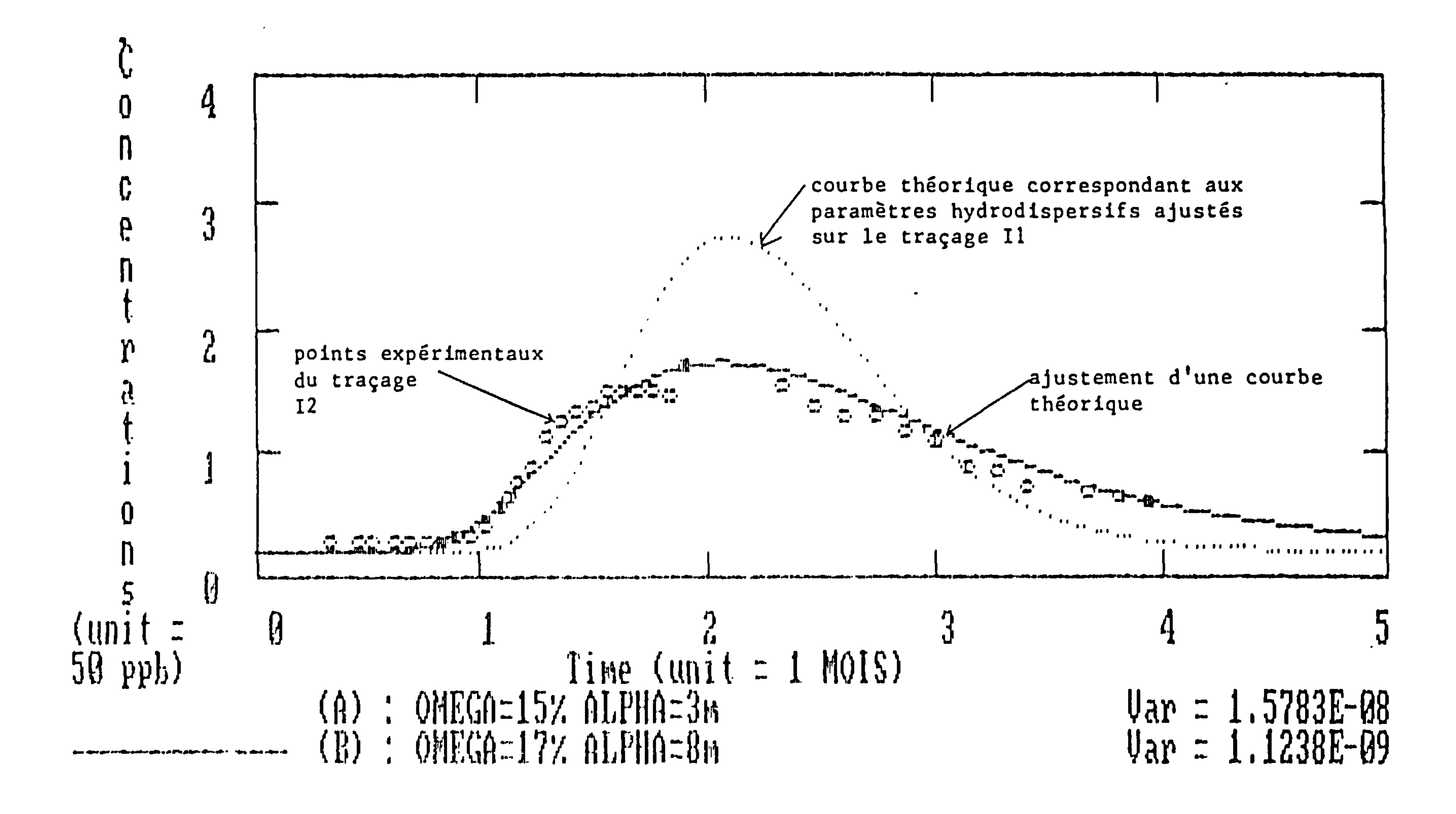
−20 0 20 40 60 80 100 120

TEMPS (jours) par rapport à l'injection I2

← Rest.I1 | Restitution du traçage I2 →



ANNEXE 5.2 - CALAGE DES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS DE L'AQUIFERE SUR LA RESTITUTION DU TRACAGE I2



EXEMPLE 2 :

TRACAGE DANS LA NAPPE ALLUVIALE DE DIJON SUD
MODELISATION DE POLLUTION POTENTIELLE EN PROVENANCE D'UNE AUTOROUTE

Client : Scetauroute Dijon

Prix de vente du traçage (hors équipement piézométrique) : 90 KF

Finalité :

Déterminer les caractéristiques hydrodispersives de la nappe, y compris la dispersion transversale, pour modéliser des scénarios de pollutions potentielles en provenance d'une autoroute.

Expérimentation et résultats (cf. extrait du rapport BRGM R 30995)

Traçage en écoulement naturel avec suivi de la restitution sur plusieurs piézomètres. Première injection d'iodure de sodium suivi de deux injections de traceurs fluorescents (uranine et rhodamine B). La restitution de l'iodure de sodium a permis de déterminer les caractéristiques hydrodispersives de la nappe ; à l'inverse les traceurs fluorescents ont été trop fortement adsorbés par le terrain pour pouvoir être interprétés.

Commentaires :

- Les résultats ont mis en évidence une dispersion latérale très faible (0.3 m). Celle-ci avait été surestimée au moment des calculs prévisionnels établis pour définir le maillage et la fréquence des analyses à effectuer. En conséquence, la première série d'analyses d'iodure n'avait pas permis de déceler le passage du traceur. Ce n'est que dans un stade ultérieur que des analyses complémentaires sur les échantillons disponibles ont mis en évidence la restitution de l'iodure.

- Cette opération a été réalisée avec le concours d'un stagiaire dans le cadre d'un stage de DESS. Malgré cette aide indispensable, le suivi manuel sur de nombreux piézomètres reste une opération lourde à gérer, sans commune mesure avec une expérimentation en écoulement radial convergent.

TRACAGE A31

TABLEAU DES RESULTATS BRUTS

INJECTION LE 26/6/89 A 14H30 SUR LE PIEZO 56
TRACEUR UTILISE : IODURE DE SODIUM (4KG)

32625.00: JOUR DE REFERENCE POUR INJECTION
783014.50: HEURE DE REFERENCE POUR INJECTION

POMPAGE DANS 56 POUR HOMOGENEISER LA SOLUTION SUR TOUTE LA COLONNE D'INJECTION
TEMPS DE POMPAGE
LE 26/06 DE 14H30 à 16H30 PUIS DE 17H15 à 18H00
LE 27/06 DE 08H15 à 09H15 PUIS DE 14H00 à 14H05
LE 28/06 DE 08H10 à 08H15

CALCUL DU TAUX DE TRACEUR PARTI DU PIEZOMETRE 56

VOLUME D'EAU DU PIEZOMETRE

DIAM.INT.DE LA CREPINE=113mm

VOL=PI*(0,056)EXP2*15=150 LITRES

QUANTITE DE TRACEUR RESIDUEL LE 28/06/89

Co=980 ppb

QTE=150*980 microgrammes
QTE=147mg
QTE=0,1g

D'OU UN DEPART DE LA TOTALITE DU TRACEUR

CONTROLE DE L'EVACUATION DU TRACEUR

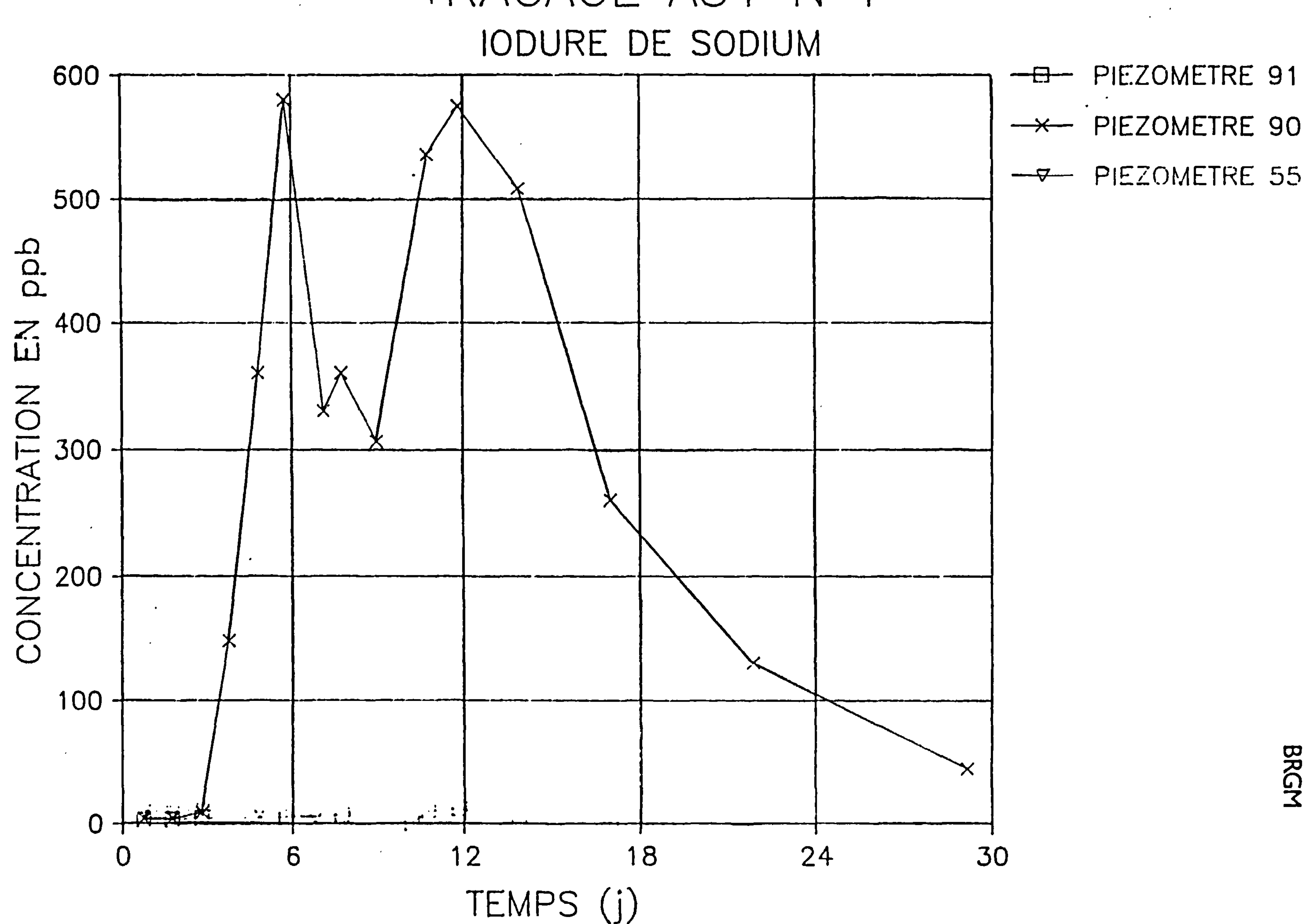
Piézomètre d'injection : 56

DATE	HEURE	TEMPS (h)	TEMPS (j)	COND. (µS/cm)
26/ 6/89	14.50	.00	.00	667.00
26/ 6/89	14.75	.25	.01	4000.00
26/ 6/89	17.33	2.83	.12	842.00
26/ 6/89	18.00	3.50	.15	869.00
27/ 6/89	8.50	18.00	.75	704.00
27/ 6/89	8.75	18.25	.76	685.00
27/ 6/89	9.00	18.50	.77	691.00
27/ 6/89	14.00	23.50	.98	690.00
28/ 6/89	8.25	41.75	1.74	660.00

ECHANTILLONAGE dernière mise à jour le : 12/ 7/90

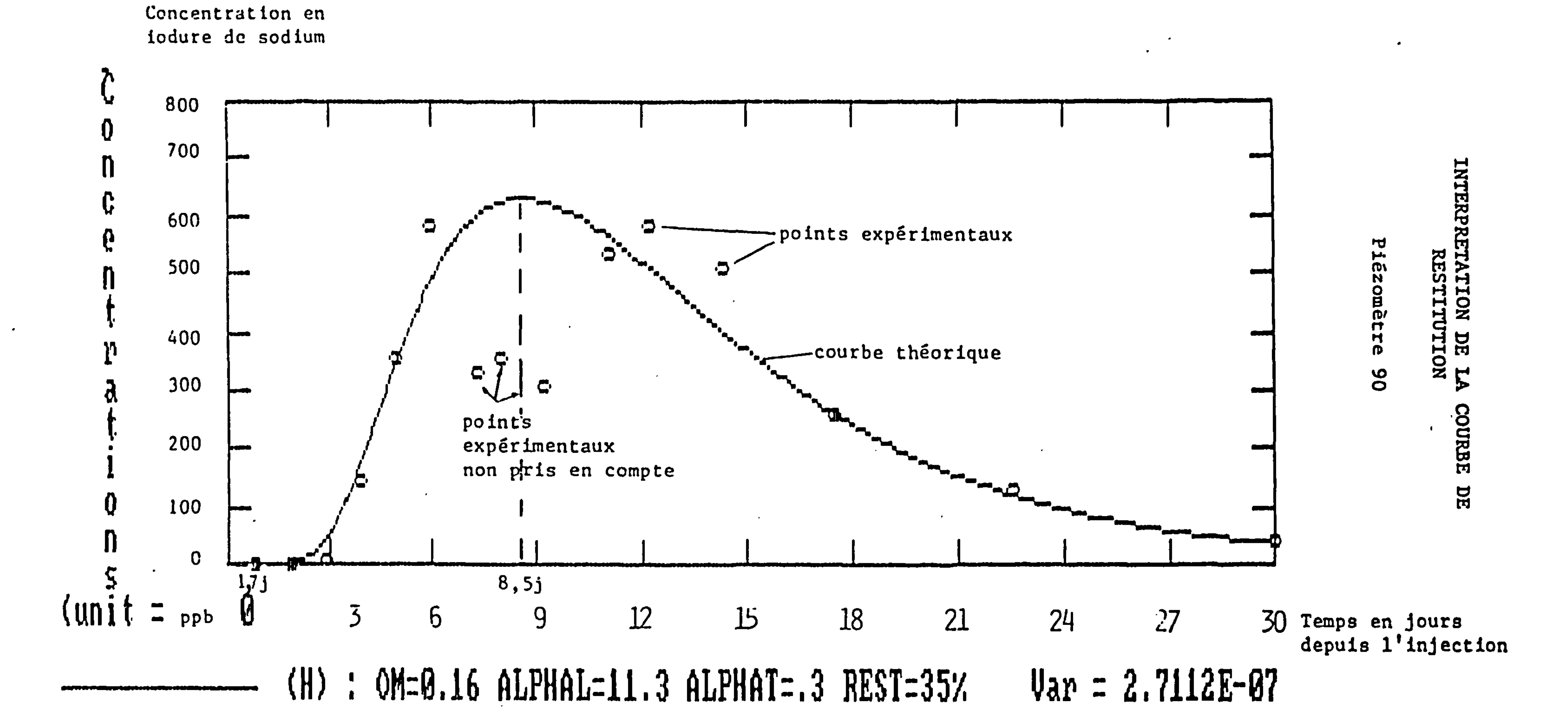
TOTAL ECHANTILLONS PRELEVES : N/D

TOTAL ECHANTILLONS PAR PIEZOMETRE :				N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
DATE DU PRELEVEMENT	HEURE	TEMPS (h) / INJEC.	TEMPS (j) / INJEC.	C3	B7	C2	C1	B6	55	56	A2	49
26/ 6/89	14.50	.00	.00	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	
27/ 6/89	9.00	18.50	.77	13.00	6.00	3.00	4.00	6.00	10.00			
27/ 6/89	14.00	23.50	.98	N/D	15.00	N/D	N/D	N/D	N/D	2100.00	5.00	
27/ 6/89	21.00	30.50	1.27	N/D	4.00	N/D	N/D	N/D	N/D			
28/ 6/89	9.00	42.50	1.77	N/D	4.00	3.00	4.00	5.00	9.00	980.00		
28/ 6/89	14.50	48.00	2.00	N/D	5.00	N/D	N/D	N/D	N/D		3.00	5.00
28/ 6/89	21.25	54.75	2.28	N/D	11.00	N/D	N/D	N/D	N/D			
29/ 6/89	10.00	67.50	2.81	N/D	6.00	4.00	9.00	7.00	11.00			
29/ 6/89	15.50	73.00	3.04	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		3.00	8.00
29/ 6/89	23.00	80.50	3.35	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D			
30/ 6/89	9.00	90.50	3.77	N/D	5.00	N/D	148.00	7.00	N/D			
30/ 6/89	16.00	97.50	4.06	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	12.00
1/ 7/89	10.00	115.50	4.81	N/D	26.00	N/D	360.00	8.00	9.00		N/D	
1/ 7/89	17.00	122.50	5.10	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D			
2/ 7/89	9.00	138.50	5.77	N/D	4.00	5.00	580.00	15.00	N/D		N/D	13.00
2/ 7/89	19.00	148.50	6.19	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D			
3/ 7/89	10.00	163.50	6.81	N/D	6.00	N/D	N/D	20.00	5.00		N/D	15.00
3/ 7/89	18.00	171.50	7.15	N/D	N/D	N/D	330.00	N/D	N/D			
4/ 7/89	9.00	186.50	7.77	N/D	4.00	7.00	360.00	18.00	N/D		N/D	16.00
4/ 7/89	18.00	195.50	8.15	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D			
5/ 7/89	14.50	216.00	9.00	N/D	3.00	N/D	306.00	19.00	N/D		N/D	15.00
6/ 7/89	11.50	237.00	9.88	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	14.00
6/ 7/89	19.50	245.00	10.21	N/D	3.00	.00	N/D	N/D	N/D			
7/ 7/89	9.00	258.50	10.77	N/D	N/D	10.00	536.00	N/D	N/D		N/D	N/D
8/ 7/89	11.00	284.50	11.85	N/D	3.00	12.00	575.00	20.00	N/D		N/D	14.00
10/ 7/89	11.50	333.00	13.88	N/D	3.00	.00	508.00	N/D	N/D			11.00
10/ 7/89	15.00	336.50	14.02								N/D	
11/ 7/89	10.50	356.00	14.83	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	11.00
12/ 7/89	11.50	381.00	15.86	N/D	5.00	N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	N/D
13/ 7/89	14.50	408.00	17.00			.00	260.00	33.00	N/D		N/D	N/D
13/ 7/89	15.00	406.50	17.02	N/D	N/D							
17/ 7/89	15.50	505.00	21.04			N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	10.00
17/ 7/89	16.00	505.50	21.06	N/D	3.00							
18/ 7/89	11.50	525.00	21.88			N/D	130.00	22.00	N/D		N/D	12.00
18/ 7/89	11.75	525.25	21.89	N/D	N/D							
19/ 7/89	16.75	554.25	23.09	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	10.00
21/ 7/89	15.00	600.50	25.02	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D		N/D	9.00
25/ 7/89	18.00	699.50	29.15	N/D			44.00					



COURBE DE RESTITUTION

BRGM



INTERPRETATION DE LA COURBE DE RESTITUTION
Piézomètre 90
Concentration en iodure de sodium
Concentrations
(unit = ppb
800
700
600
500
400
300
200
100
0
1,7j
8,5j
0
3
6
9
12
15
18
21
24
27
30
Temps en jours depuis l'injection
points expérimentaux
courbe théorique
points expérimentaux non pris en compte
(H) : OM=0.16 ALPHAL=11.3 ALPHAT=.3 REST=35% Var = 2.7112E-07
BRGM

SIMULATION DE LA COURBE DE RESTITUTION SUR DES PIEZOMETRES SITUES A 5, 10, 15 ET 20m DE L'AXE PZ 56, PZ 90

Concentrations (unit = PPB)

800
700
600
500
400
300
200
100
0

0 3 6 9 12 15 18 21 24

Time (unit = 3 JOURS)

(A) : AL=11.3 AT=.3 OM=.16 REST=38% PZ90 (80,0)
(B) : IDEM PZ 55B(80,10)
(C) : IDEM PZ 55A(80,25)
(D) : IDEM PZ(80,5)
(E) : IDEM PZ(80,15)
(F) : IDEM PZ(80,20)



Panache transversal des concentrations calculées

Oméga=16%, AlphaL=11.3 m, AlphaT=0.3 m

CONCENTRATION(ppb)

800
600
400
200
0

−40 −30 −20 −10 0 10 20 30 40

DIST(m)/AXE D'ECOULEMENT Pz56−Pz90

CONC A 9 JOURS
CONC A 6 JOURS
CONC A 15 JOURS



EXEMPLE 3 :

TRACAGE DANS UNE NAPPE DE LA CRAIE FISSUREE
ETABLISSEMENT DE PERIMETRES DE PROTECTION

Client : Scetauroute Troyes

Prix de vente du traçage (hors équipement piézométrique) : 40 KF

Finalité :

Définition de périmètres de protection en rapport avec le passage d'une autoroute.

Expérimentation et résultats (cf. extraits rapport BRGM R 30768)

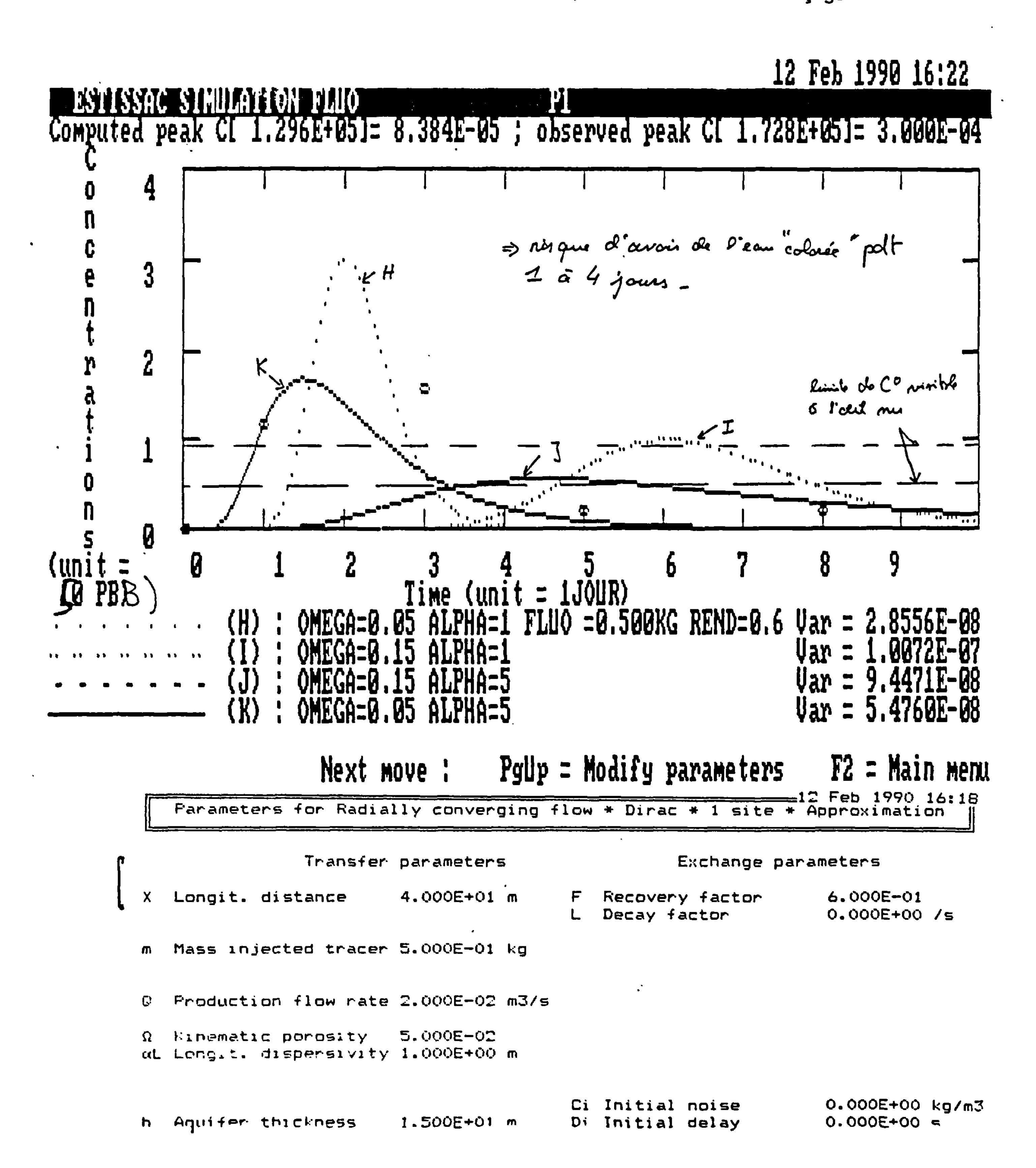
Réalisation d'un traçage double (iodure de sodium et fluorescine) en écoulement radial convergent induit par pompage.

Le débit de pompage au moment de l'expérimentation n'étant pas celui de l'exploitation, les vitesses de propagation d'une pollution ont ensuite été recalculées pour le débit réel d'exploitation à partir des paramètres hydrodispersifs définis par le traçage.

Commentaires :

- Dans ce milieu, la restitution de la fluorescine est assez similaire à celle de l'iodure de sodium.
- Les résultats au puits de pompage ont été tout à fait conformes aux calculs prévisionnels.
- Ce traçage a été couplé à un pompage d'essai vendu dans le cadre de cette même étude, ce qui permet d'optimiser grandement les coûts réels de l'opération.

Traçage ESTISSAC : exemple de calcul prévisionnel avant traçage



2.1.3 - Réalisation du traçage

Injection

Le traçage s'est effectué le 14/02/90 à 18h30 par une double injection dans le piézomètre PZA afin de définir les vitesses de circulation dans la nappe et les paramètres hydrodispersifs du milieu.

Les deux traceurs utilisés étaient :

- 750 g d'iodure de sodium (suivi des ions I-, soit 640g d'I- injecté) ;

- 500 g de fluorescéine.

Afin d'homogénéiser la solution, l'injection s'est accompagnée d'un pompage en circuit fermé pendant deux heures.

Surveillance

Ce traçage a été réalisé dans des conditions d'écoulement radial convergent créés par le pompage sur le puits du Bétrot de la commune d'Estissac ;

La restitution du traceur a été suivie sur le PZB et sur le puits situé respectivement à 15 et 40m du point d'injection par des préleveurs automatiques. La durée totale de la surveillance de cette restitution fut de 108 h avec une fréquence d'échantillonnage de 1h30 sur les premières 24 h, puis fixée à 2h. Des prélèvements manuels sur le piézomètre d'injection ont permis de s'assurer de la bonne évacuation du traceur dans l'aquifère.

2.2.4 - Résultats et interprétation du traçage

* Résultat

La courbe de restitution de l'iodure de sodium observée sur le puits est présentée en annexe 5.1.

Cette courbe montre un aspect régulier unimodal avec un pic apparaissant au bout d'un jour et demi. Le taux de restitution du traceur a été calculé par intégration du flux d'iodure mesuré, en fonction du temps, sur les 6 jours de la restitution du traceur. Il est de l'ordre de 25%. Ce taux est jugé satisfaisant étant donné l'éloignement entre le point d'injection (PZA) et le point d'observation (puits situé à 40m). Il atteste d'une bonne représentativité de l'expérimentation.

La courbe de restitution de l'uranine (annexe 5.2) donne des résultats similaires : courbe régulière unimodale présentant un pic au bout de 30h environ.

* Interprétation

Bien que les courbes de restitution des 2 traceurs soient très voisines l'une de l'autre, l'interprétation des résultats sera effectuée sur l'iodure de sodium qui est considéré meilleur traceur que l'uranine.

- Paramètres hydrodispersifs de l'aquifère

Les paramètres hydrodispersifs de l'aquifère (porosité cinématique et coefficient de dispersion longitudinal) ont été calculés à l'aide du logiciel CATTI (computer assisted interpretation of field tracer tests), développé au BRGM.

Une courbe théorique a pu être parfaitement calée avec les points expérimentaux. Ce calage retenu est présenté en annexe 5.3. Il aboutit aux valeurs des paramètres suivants :

. porosité cinématique (w) = 7%

. coefficient de dispersion longitudinal (αL) = 6,2 m

Ces paramètres hydrodispersifs, caractéristiques de l'aquifère, seront utilisés pour les simulations de restitution de l'iodure de sodium pour un débit de pompage de 36 m3/h (débit actuel d'utilisation) et pour le calcul des isochrones.

- Vitesse de circulation de l'eau

Le pic de la courbe de restitution (cf. annexe 5.3) apparaît 36 h après l'injection. Les particules les plus rapides arrivent quant à elles au bout de 7 h.

En conséquence, pour les conditions hydrauliques de l'essai (écoulement radial convergent avec un débit d'exploitation de 110 m3/h), la vitesse modale de déplacement du traceur est de l'ordre de 26 m/j et la vitesse de déplacement des particules les plus rapides est de 130 m/j.

La détermination des paramètres hydrodispersifs de l'aquifère autorise une simulation de la courbe de restitution pour un débit pompé de 36 m3/h au puits P1, débit normal d'utilisation (cf. annexe 5.4). Dans ces conditions hydrauliques, la vitesse modale de déplacement du traceur est réduite à 8,5 m/j et la vitesse des particules les plus rapides à 46 m/j.


COURBE DE RESTITUTION AU PUITS
TRACEUR:IODURE DE SODIUM
CONCENTRATION IODURE (µg/l)
0
5
10
15
20
25
30
35
40
0
24
48
72
96
120
TEMPS EN HEURES DEPUIS L'INJECTION


BRGM

ANNEXE 5.1

COURBE DE RESTITUTION AU PUITS

TRACEUR:URANINE

CONCENTRATION(10-9 Kg/l)

150

100

50

0

0 24 48 72 96 120

TEMPS EN HEURES DEPUIS L'INJECTION



ANNEXE 5.2

ANNEXE 5.3

CALAGE DES PARAMETRES HYDRODISPERSIFS DE L'AQUIFERE

Concentrations (unit = PPB)

50
40
30
20
10
0

points expérimentaux

courbe théorique

7h
36h

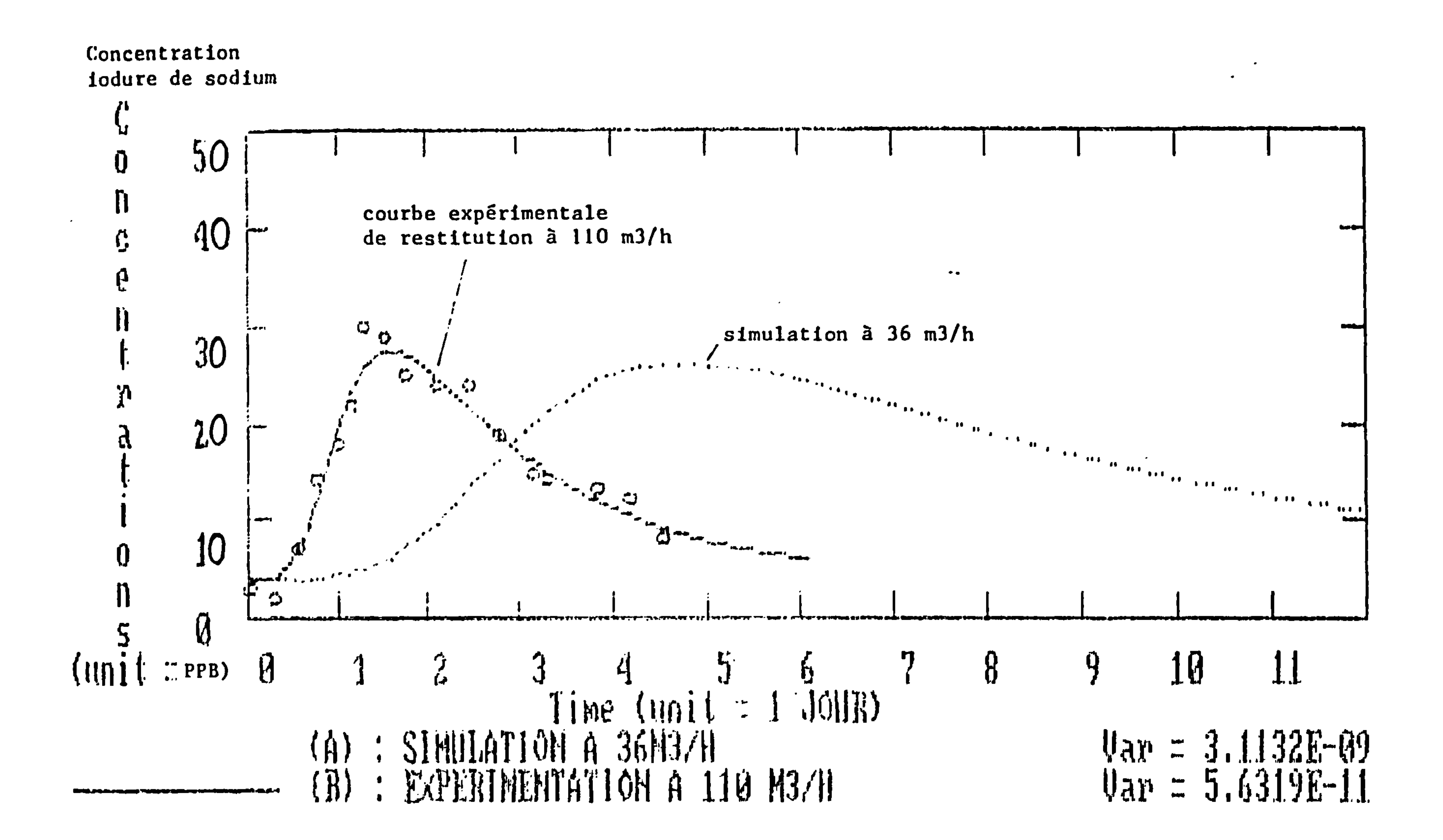
0 1 2 3 4 5 6 7 8

Time (unit = 1 JOUR)

(A) : NUM AUTO OMEGA=7E-2 ALPHA=6.2 REST=23.5% Var = 5.2216E-11



SIMULATION DE LA COURBE DE RESTITUTION DE L'IODURE DE SODIUM POUR UN DEBIT DE 36 M3/H



BRGM

R 31 547